

OSTLUFT – DIE LUFTQUALITÄTSÜBERWACHUNG DER OSTSCHWEIZER KANTONE UND DES FÜRSTENTUMS LIECHTENSTEIN

NO₂-IMMISSIONEN OSTSCHWEIZ / LIECHTENSTEIN

MODELL UND RESULTATE 2005– 2020

Schlussbericht

Zürich, 27. November 2012

J. Heldstab, F. Leippert, INFRAS

T. Künzle, METEOTEST

NO2_OSTLUFT_121127.DOCX

METEOTEST
FABRIKSTRASSE 14
CH-3012 BERN
OFFICE@METEOTEST.CH

t +41 31 307 26 26
f +41 31 307 26 10

WWW.METEOTEST.CH

INFRAS



INFRAS
BINZSTRASSE 23
POSTFACH
CH-8045 ZÜRICH
t +41 44 205 95 95
f +41 44 205 95 99
ZUERICH@INFRAS.CH

MÜHLEMATTSTRASSE 45
CH-3007 BERN

WWW.INFRAS.CH

ÜBERSICHT

Zusammenfassung	4
1. EINLEITUNG	6
1.1. Ausgangslage	6
1.2. Auftrag	6
2. NO_x-EMISSIONEN 2005–2020	6
2.1. Emissionsquellen nach Sektoren	6
2.2. Verkehr	8
2.2.1. Strassenverkehr	8
2.2.2. Schienenverkehr	10
2.2.3. Schiffsverkehr	11
2.2.4. Flugverkehr	11
2.3. Industrie	11
2.3.1. Stationäre Quellen	11
2.3.2. Mobile Quellen	12
2.4. Haushalte und Dienstleistungen	12
2.4.1. Stationäre Quellen	12
2.4.2. Mobile Quellen	12
2.5. Land- und Forstwirtschaft	12
2.5.1. Landwirtschaft	12
2.5.2. Forstwirtschaft	13
2.6. NO _x -Emissionsbilanz und Emissionskarten	13
2.6.1. Emissionsbilanz	13
2.6.2. Emissionskarten	14
3. IMMISSIONSMODELLIERUNG	23
3.1. Modellkonzept	23
3.2. Ausbreitungsrechnung	25
3.2.1. Prinzip	25
3.2.2. Meteorologie	26
3.2.3. Emissionshöhe/ Quellentyp	28
3.2.4. Schadstoffausbreitung Innerorts	29
3.2.5. Zuordnung von Quellen zu den Transferfunktionen	30
3.3. NO _x -Hintergrundimmission	30

3.4.	Grenznahes Gebiet _____	31
3.5.	NO _x -/NO ₂ -Umwandlung _____	32
3.6.	Umsetzung _____	34
4.	MODELLRESULTATE _____	35
4.1.	NO _x - und NO ₂ -Belastungskarten für 2005–2020 _____	35
4.1.1.	NO _x -Belastungskarten nach Sektoren _____	35
4.1.2.	NO _x -Belastungskarte Total _____	41
4.1.3.	NO ₂ -Belastungskarten _____	42
4.2.	Bevölkerungsexposition NO ₂ 2005–2020 _____	54
5.	DATENQUALITÄT _____	56
5.1.	Vergleich Messwerte versus Modellwerte _____	56
5.1.1.	Kalibration und Validierung _____	56
5.1.2.	Messstationen _____	56
5.2.	Vergleich NO _x -Modelldaten mit Messdaten _____	59
5.3.	NO ₂ -Vergleich Modell- mit Messdaten _____	60
5.3.1.	Vergleich mit Monitor-Messdaten _____	60
5.3.2.	Vergleich mit Passivsammler-Messdaten _____	62
	Literatur _____	64

ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Bericht beschreibt Methoden und Resultate der neusten NO₂-Immissionsmodellierung für die Jahre 2005, 2010, 2015 und 2020 für das OSTLUFT Gebiet. Gegenüber der früheren Modellversion (OSTLUFT 2003) wurden alle Inputdaten aktualisiert, insbesondere der OSTLUFT Emissionskataster, das Verkehrsmodell inkl. Verkehrs-Emissionsfaktoren. Weiter wurde die Ausbreitungsrechnung weiterentwickelt und die Umwandlung von NO_x- in NO₂-Immissionen verbessert, wobei diese Neuerungen in Anlehnung an Änderungen erfolgten, die kürzlich am nationalen Immissionsmodell vollzogen wurden (FOEN 2011b).

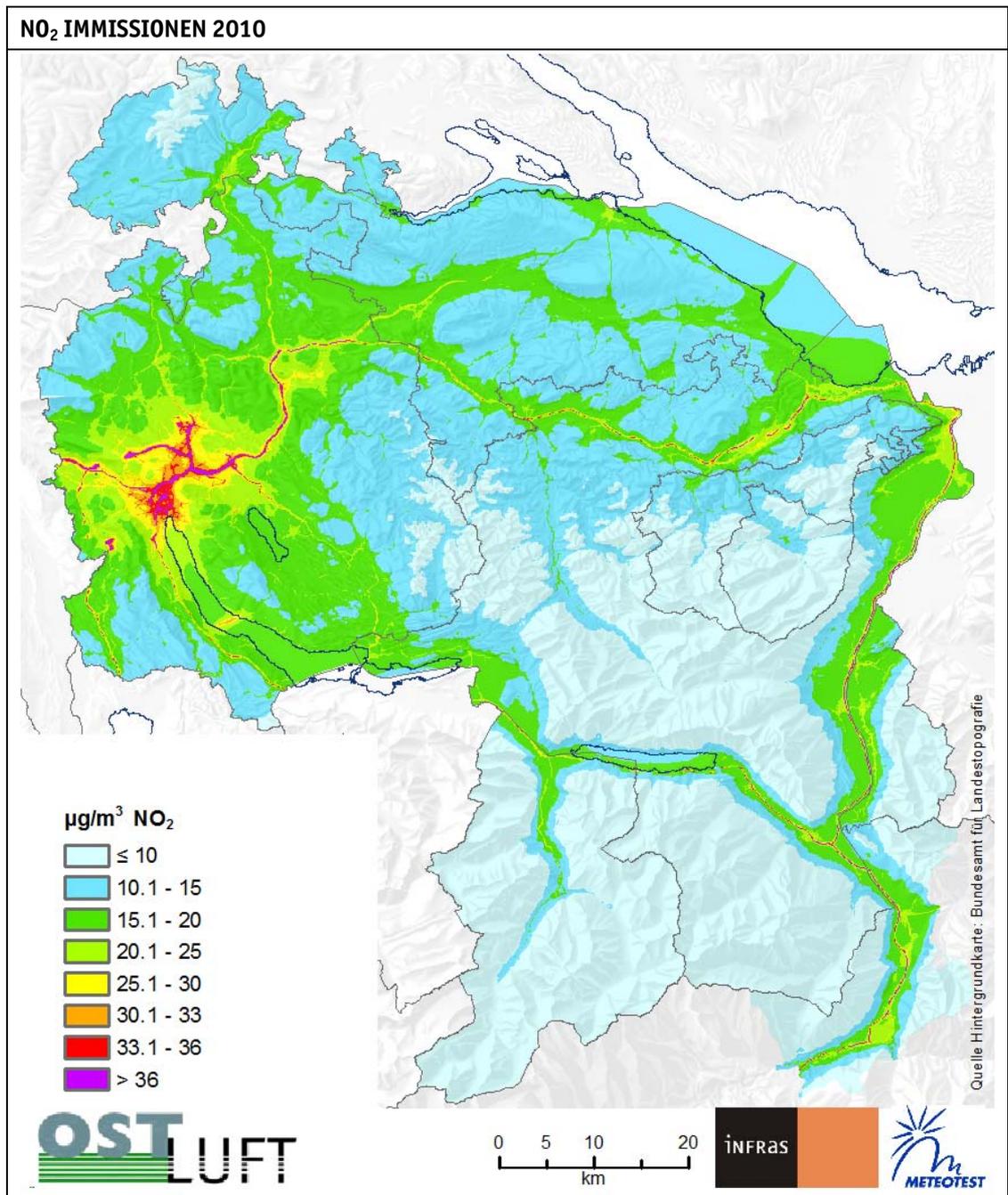
Die folgende Figur 1 zeigt die NO₂-Belastungskarte für die Ostschweiz 2010. Alle Konzentrationen sind als Jahresmittelwerte in µg/m³ und in Hektaraufösung angegeben. Ein Vergleich der Modellwerte mit Messwerten 2009/2010 zeigt eine gute Übereinstimmung.

Die NO₂-Belastungskarte ist von besonderem Interesse, weil die Schweizer Gesetzgebung einen NO₂-Immissionsgrenzwert von 30 µg/m³ vorschreibt. Überschreitungen des Grenzwertes im Hektarraster treten im Jahr 2010 grossflächig noch in der Stadt Zürich und ihrer nahen Umgebung auf, in geringem Masse auch in den Städten Winterthur und St.Gallen sowie entlang der Autobahnen. Dabei ist zu beachten, dass die Belastungskarte räumliche Mittelwerte je Hektare repräsentiert. Auf einer Skala unterhalb des Hektarrasters (< 100m), ist deshalb auch in anderen Gebieten, vor allem entlang von vielbefahrenen Strassen, mit Grenzwertüberschreitungen zu rechnen. Wie aufgrund künftiger Emissionsreduktionen zu erwarten ist, nehmen die Immissionen von 2005 bis 2020 ab, sodass grossflächige Gebiete mit übermässiger Belastung dannzumal nur noch in der Stadt Zürich und an besonders exponierten Standorten vorkommen werden. Damit nimmt auch der Anteil der Bevölkerung, welcher über dem NO₂-Immissionsgrenzwert von 30 µg/m³ lebt, von 13.2% (2005) auf unter 1% (2020) ab.

Bei den Aussagen zur Immissionssituation 2020 ist unbedingt zu berücksichtigen, dass sie besonders stark von dem erwarteten Emissionsrückgang des Verkehrs dank neuer Abgasnormen abhängig ist. Sollte sich in den nächsten Jahren zeigen, dass die neuen EURO Normen in der Realität nicht zu den erwarteten Emissionsreduktionen führen, würde sich die Immissionssituation 2020 weniger optimistisch präsentieren.

Die neue Modellversion wurde anhand von NO_x- und NO₂-Messdaten der Monitorstandorte für den Zeitstand 2005 kalibriert und anschliessend mit den Messdaten 2010 validiert. Für den Zeitstand 2010 findet man eine hohe Korrelation: R = 0.91 (R² = 0.83). Die für den Vergleich benutzten Messdaten haben einen NO_x-Mittelwert von 41.2 µg /m³, die entsprechenden Modell-

werte $40.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Residuen zeigen keine systematischen Abweichungen, sodass man insgesamt von einer guten Übereinstimmung von Modell und Messungen sprechen darf.



Figur 1 Jahresmittelwert NO₂-Immissionen 2010.

1. EINLEITUNG

1.1. AUSGANGSLAGE

OSTLUFT betreibt seit mehreren Jahren ein Immissionsmodell für die Berechnung der Jahresmittelwerte von Stickstoffdioxid (NO₂). Das Modell wurde seinerzeit von der Arbeitsgemeinschaft INFRAS/METEOTEST im Auftrag des BAFU und des ATAL aufgebaut (ATAL/BUWAL 1994). Seither wurde es in mehreren Etappen erweitert und verfeinert und für den Bund und mehrere Kantone angewendet (BUWAL 1997, OSTLUFT 2003, SAEFL 2004, LHA/AFU 2005, FOEN 2011b).

1.2. AUFTRAG

OSTLUFT hat die Arbeitsgemeinschaft INFRAS/METEOTEST beauftragt, das NO₂-OSTLUFT Immissionsmodell (OSTLUFT 2003) auf die neueste Version (FOEN 2011b) zu aktualisieren, die Jahre 2005, 2010, 2015 und 2020 zu modellieren und die neue Modellapplikation wieder OSTLUFT zur Weiterverwendung zu übergeben.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Resultate 2005–2020 für das OSTLUFT Gebiet. Ebenfalls sind die wichtigsten Eigenschaften des neuen Modelles sowie die Besonderheiten der OSTLUFT-Adaption des nationalen NO₂-Modelles (FOEN 2011b) dokumentiert.

Im Zusammenhang mit diesem Auftrag sei noch erwähnt, dass OSTLUFT auch das zweite von INFRAS/METEOTEST entwickelte, nämlich das **Feinstaub-Modell** betreibt und die Arbeitsgemeinschaft auch mit dessen Aktualisierung beauftragt hat. Die beiden Aufträge laufen sequenziell: Die Aktualisierung des Feinstaubmodells ist inzwischen ebenfalls sehr weit fortgeschritten, die Resultate liegen vor und die zugehörige, separate Dokumentation ist im Entstehen.

2. NO_x-EMISSIONEN 2005–2020

2.1. EMISSIONSQUELLEN NACH SEKTOREN

OSTLUFT hat kürzlich einen Emissionskataster aufgebaut, der unter anderen Schadstoffen auch NO_x enthält (OSTLUFT 2011). Die NO_x-Emissionsfrachten für das OSTLUFT Gebiet wurden der Arbeitsgemeinschaft INFRAS/METEOTEST für die Immissionsmodellierung zur Verfügung gestellt. Berechnungsvorschriften und räumliche Aufteilung der Emissionen sind in OSTLUFT (2011) im Detail beschrieben.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über Sektoren und Emissionsquellen, deren Berechnungsgrundlage, über die Indikatoren zur Abschätzung der zeitlichen Entwicklung und die räumliche Zuordnung („Lokalisierung“). Soweit Berechnungen und Lokalisierungen der Emissionen in OSTLUFT (2011) dokumentiert sind, wird in diesem Dokument nur darauf verwiesen. Wo andere Datenquellen oder Zuordnungen verwendet wurden, sind diese in den nachfolgenden Kapiteln kurz beschrieben.

Sektor	Emissionsquelle	Emissionsberechnung	Indikatoren	Lokalisierung
Verkehr	Strasse - Linkemissionen warm	VM-UVEK/AWEL		Strassennetz, Zonen
	Strasse - Zonenemissionen Start, Stop, Tankatmung	VM-UVEK/AWEL		Strassennetz, Zonen
	Strasse - Zonenemissionen warm	VM-UVEK/AWEL		Strassennetz, Zonen
	Strassenverkehr Tunnel	VM-UVEK/AWEL		Strassennetz, Zonen
	Luftfahrt	EMIS	Flughafen/ INFRAS/METEOTEST	ZH
	Schiene	EMIS	INFRAS/METEOTEST	Streckennetz und Belastungen
	Schiffe	EMIS	Bestandeszahlen/ Streckenlängen	Seen gleichmässig und Fahrstrecke
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	Brand-/Feuerschäden	EMIS	Gebäude	GZ 2000, Gebäude total
	Feuerungen	NA	AWEL-Methode	HH: GZ 2000; DL: BZ Sektor 3, 2005, Arbeitsplatzzahlen total
	Garten/Hobby	EMIS	Einwohner/Gebäude	GZ 2000, Einwohnerproportional
Industrie	Baumaschinen	EMIS	Investitionen	Arealstatistik (NOAS92)
	Industrie - Einzelquellen	kant. Angaben	Kantonsangaben	Landeskoord.
	Industrielle Fahrzeuge	EMIS	Beschäftigtenzahlen	BZ Sektor 2, 2005
	Industrielle und gewerbliche Prozesse	EMIS	Beschäftigtenzahlen oder Kantonsangaben	BZ Sektor 2, 2005, Arbeitsplatzzahlen total
	Verwendung von Lösemittel	EMIS	Beschäftigtenzahlen oder Punktquellen falls bekannt	BZ Sektor 2, 2005, Arbeitsplatzzahlen total
Land-/Forstwirtschaft	Feuerungen	EMIS	Beschäftigtenzahlen	BZ Sektor 1, 2005, Arbeitsplatzzahlen total
	Forstwirtschaftliche Fahrzeuge	EMIS	Beschäftigtenzahlen	Arealstatistik (NOAS92)
	Landwirtschaftliche Fahrzeuge	EMIS	Bestandeszahlen	Arealstatistik (NOAS92)
	Nutzflächen	EMIS	Bodenflächen	Arealstatistik (NOAS92)
	Offene Verbrennung	EMIS	Beschäftigtenzahlen	Arealstatistik (NOAS92)
	Vieh	EMIS	Bestandeszahlen	Arealstatistik (NOAS92)

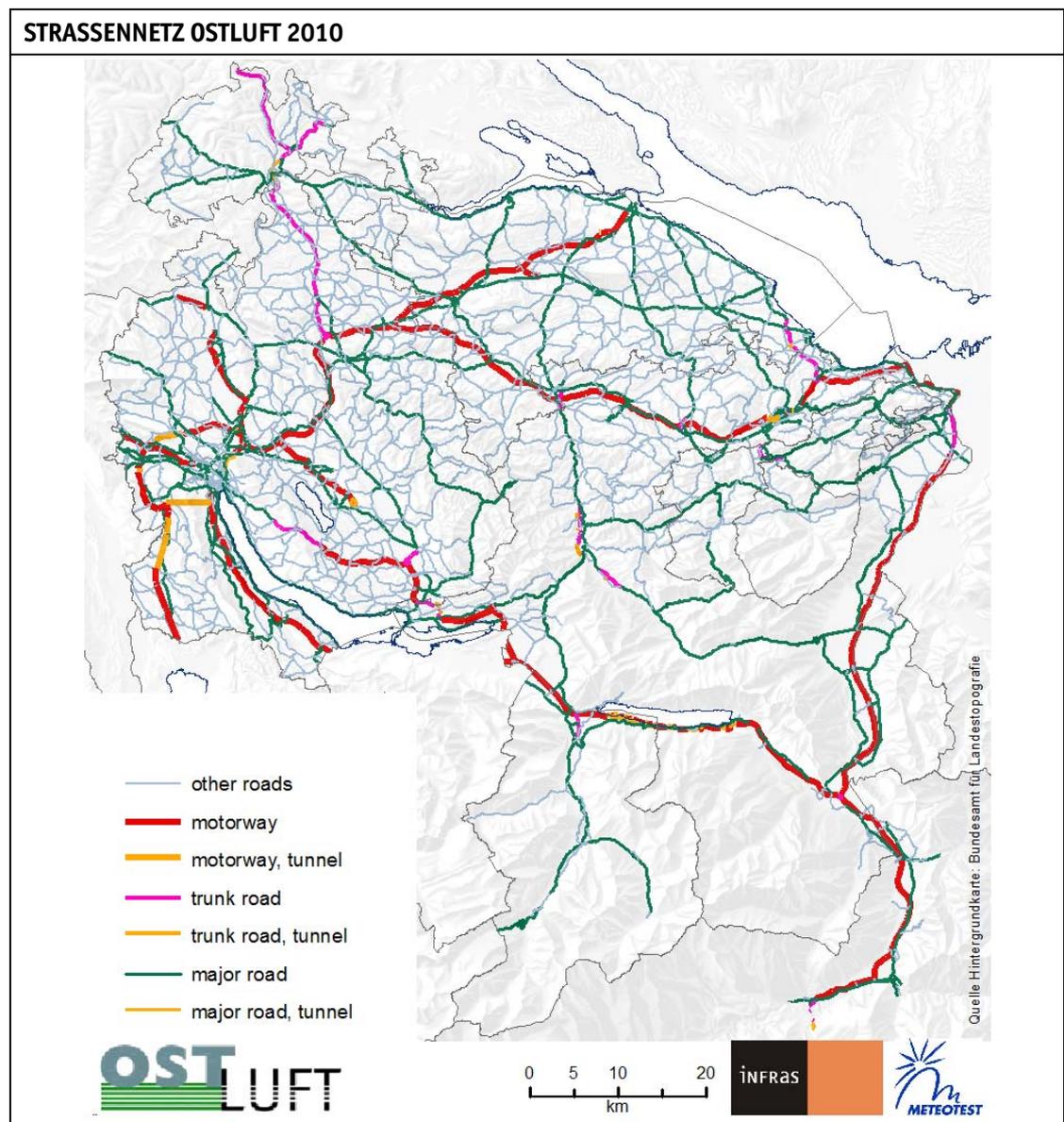
Tabelle 1 Emissionsgrundlagen: Emissionsquellen, Berechnungsgrundlage der Emissionen (VM-UVEK= Verkehrsmodell des UVEK, EMIS = nationale Emissionsdatenbank des BAFU), Indikatoren der zeitlichen Entwicklung der Emissionen sowie Lokalisierungsvorschrift (in Klammern die jeweilige Landnutzungskategorie gemäss Arealstatistik).

2.2. VERKEHR

2.2.1. STRASSENVERKEHR

Aktivitätsdaten

Aus dem nationalen Strassenverkehrsmodell des VM-UVEK (ARE 2010) hat OSTLUFT die Zustände für die Jahre 2005 und 2030 als GIS-Layer erhalten und hat daraus weitere Zustände für 2010, 2015 und 2020 generiert. Die Daten enthalten die Fahrleistungen nach Fahrzeugkategorien je Strassenabschnitt (Link) und je Zone (Gemeinde oder Stadtquartier) sowie weitere Attribute. Die folgende Figur zeigt den Ostschweizer Ausschnitt des VM-UVEK Strassennetzes.



Figur 2 Das für die OSTLUFT-Verkehrsmodellierung berücksichtigte Strassennetz.

Fahrzeugbestände, Anteile nach Treibstoffart, Anzahl Starts/Stopps wurden nationalen Daten entnommen (BAFU 2010a). Für die Zeitentwicklung 2005–2020 der Aktivitätsdaten wurden folgende Faktoren aus dem nationalen Modell verwendet (INFRAS 2010).

AKTIVITÄTSDATEN STRASSENVERKEHR								
Aktivitätsdaten	Fahrzeugkat.	Treibstoff	Einheit	Änderungsfaktoren (2005 = 1)				
				2010	2015	2020	2025	2030
Fahrleistungen (hot)	PW	Benzin	Fzkm	0.942	0.868	0.811	0.780	0.776
Fahrleistungen (hot)	PW	Diesel	Fzkm	1.700	2.343	2.880	3.189	3.368
Fahrleistungen (hot)	LCV	Benzin	Fzkm	0.724	0.573	0.465	0.406	0.372
Fahrleistungen (hot)	LCV	Diesel	Fzkm	1.288	1.429	1.532	1.615	1.693
Fahrleistungen (hot)	HGV	Diesel	Fzkm	1.083	1.168	1.218	1.252	1.277
Fahrleistungen (hot)	Car	Diesel	Fzkm	1.125	1.104	1.087	1.079	1.076
Fahrleistungen (hot)	Stadtbus	Diesel	Fzkm	1.053	1.092	1.140	1.191	1.249
Fahrleistungen (hot)	Motorrad	Benzin	Fzkm	1.093	1.143	1.195	1.250	1.307
Anzahl Starts	PW	Benzin	Starts	0.910	0.841	0.781	0.760	0.753
Anzahl Starts	PW	Diesel	Starts	1.635	2.227	2.685	2.982	3.119
Anzahl Starts	LCV	Benzin	Starts	0.742	0.595	0.492	0.437	0.408
Anzahl Starts	LCV	Diesel	Starts	1.331	1.489	1.603	1.693	1.775
Anzahl Stopps (soak)	PW	Benzin	Stopps	0.910	0.841	0.781	0.760	0.753
Anzahl Stopps (soak)	LCV	Benzin	Stopps	0.742	0.595	0.492	0.437	0.408
Anzahl Stopps (soak)	Motorrad	Benzin	Stopps	1.075	1.104	1.133	1.157	1.181
Fahrzeugbestand (diur)	PW	Benzin	Fahrzg	0.935	0.869	0.821	0.795	0.793
Fahrzeugbestand (diur)	LCV	Benzin	Fahrzg	0.742	0.595	0.492	0.437	0.408
Fahrzeugbestand (diur)	Motorrad	Benzin	Fahrzg	1.055	1.076	1.098	1.120	1.144

Tabelle 2 Zeitliche Entwicklung der Aktivitätsdaten Strassenverkehr bezogen auf den Basiszeitstand 2005 (INFRAS 2010). Folgende Aktivitäten wurden verwendet: Fahrleistungen (hot) = Emissionen aus dem Fahrbetrieb, Anzahl Starts = Emissionen beim Start, Anzahl Stopps (soak) = Verdampfung nach Warm- und Heissabstellen, Fahrzeugbestand (diurn) = Verdampfung infolge Tankatmung bei abgestellten Fahrzeugen. Folgende Fahrzeugkategorien werden unterschieden: PW= Personwagen, LCV= leichtes Nutzfahrzeug, HGV = schweres Nutzfahrzeug.

Emissionsfaktoren, Emissionen

Aus den Aktivitätsdaten und unter Verwendung von Emissionsfaktoren (INFRAS 2010) hat OSTLUFT die Emissionen des Strassenverkehrs berechnet. Die von OSTLUFT errechneten Strassenverkehrsemissionen wurden mit dem nationalen Modell aus FOEN (2011a) verglichen und sind plausibel.

Strassentunnels

Die Emissionen welche in Strassentunneln entstehen, werden separat betrachtet. Die in den Tunnels entstehenden Emissionsfrachten werden an den Tunnelportalen bzw. den Abluftschächten spezifisch verteilt.

Lokalisierungsvorschriften

Die Emissionen aus Links werden naturgemäss ihren georeferenzierten Links zugeordnet. Die Emissionen aus Zonen, von denen nur die Zugehörigkeit zu einer Gemeinde oder zu einem Stadtquartier bekannt ist, erfordern aber zusätzliche Festlegungen:

- › „Zonenemissionen kalt“: Die Emissionen aus Kaltstarts sowie Stopps und Tankatmung werden mithilfe der Bestandeszahlen der Motorfahrzeuge (Eidgenössische Motorfahrzeugkontrolle, Bezugsjahr 2000) und Bauzonen nach Zone (Gemeinde) berechnet.
- › „Zonenemissionen warm“: Für die Emissionen des Verkehrs auf Strassenabschnitten, welche im Linknetz des VM-UVEK zwar nicht enthalten, aber lokal trotzdem bedeutsam sind, gibt es keine einfachen Lokalisierungsvorschriften. Für das schweizerische Modell wurden Regeln zur Zuordnung entwickelt, die auch für die Ostschweiz übernommen worden sind (FOEN 2011b): Ein Teil der Emissionen wird Strassen zugeordnet, die im VM-UVEK nicht enthalten sind (sich aber mit einem GIS und den Vektorkarten der Landestopografie in den Emissionskataster integrieren lassen), ein weiterer Teil wird proportional zur Einwohnerdichte verteilt.

Für weitere Details zu der Modellierung des Strassenverkehrs wird auf Bericht zum NO₂-Modell Schweiz verwiesen (FOEN 2011b).

2.2.2. SCHIENENVERKEHR

Die Emissionen des Schienenverkehrs (Rangierlokomotiven mit Dieselmotor und Lokomotiven von Bau- und Dienstzügen) wurden für das NO₂-Modell Schweiz berechnet; eine Beschreibung findet sich in OSTLUFT (2011). Die wesentlichen Elemente sind:

- › Die Emissionen 2005 aus Dieselloks auf den Rangierbahnhöfen werden aus Angaben der SBB (2010) zum Dieserverbrauch der Rangierbahnhöfe abgeleitet. Für das Ostschweizer Gebiet betrifft dies die Rangierbahnhöfe Limmattal und Buchs.
- › Die übrigen Emissionen aus Dieselloks (Dienst- und Bauzüge) werden homogen auf dem gesamten Schienennetz verteilt.
- › Emissionen auf den Liechtensteiner Bahnstrecken werden analog den Belastungen auf der Schweizer Seite abgeschätzt.

- › Die zeitliche Entwicklung wird von den Emissionen des schweizerischen Schienenverkehrs übernommen (FOEN 2011a).

2.2.3. SCHIFFSVERKEHR

Die Emissionen des Schiffverkehrs werden aus dem nationalen Total (FOEN 2011a) basierend auf den Schiffsbeständen, Schiffskilometern und den Seenflächen auf das OSTLUFT Gebiet heruntergerechnet (OSTLUFT 2011). Für die Fähre auf dem Zürichsee (Horgen–Meilen) und auf dem Bodensee (Romanshorn–Deutschland) werden die Emissionen auf der Fährstrecke verteilt.

2.2.4. FLUGVERKEHR

Die Flughafen Zürich AG betreibt ein eigenes Immissionsmodell und stellt ein Immissionsgrid für das Areal des Flughafens Zürich für das Bezugsjahr 2009 freundlicherweise zur Verfügung (Flughafen Zürich AG 2010). Es enthält die NO₂-Immissionen in Bodennähe aus den LTO-Zyklen (landing-takeoff cycle) der Flugzeuge und auch diejenigen des Verkehrs von Motorfahrzeugen auf dem Flughafenareal.

Die in der Emissionsbilanz von Tabelle 3 angegebenen Emissionen entsprechen 50% der im Umweltbericht des Flughafen Zürichs ausgewiesenen Emissionen (Flughafen Zürich AG 2011), weil die restlichen Emissionen in Höhen ausgestossen werden, die zu einem allgemeinen Hintergrund beitragen, in der nahen Umgebung des Flughafens, aber nicht mehr als Zusatzimmissionen identifizierbar sind. Die Emissionsentwicklung und damit auch die Entwicklung der Immissionen 2005–2020 ist proportional zu der Entwicklung der gesamten Schweizer Emissionen aus dem Flugverkehr gemäss FOEN (2011a) abgeschätzt.

2.3. INDUSTRIE

2.3.1. STATIONÄRE QUELLEN

Die grossen industriellen Einzelquellen und deren Emissionen sind den Kantonen bekannt und werden punktgenau mit ihren Landeskoordinaten erfasst. Die übrigen Emissionen aus industriellen Feuerungsanlagen wurden von OSTLUFT aus den schweizerischen Emissionen mit Hilfe der Beschäftigtenzahlen Sektor 2 auf das OSTLUFT heruntergerechnet und lokalisiert.

Die Emissionsentwicklung 2005–2020 ist proportional zur Entwicklung der gesamten Schweizer Emissionen aus den stationären, industriellen Emissionen FOEN (2011a) abgeschätzt.

2.3.2. MOBILE QUELLEN

Die Emissionen der Baumaschinen stammen aus Schöffeler/Keller (2008) für die gesamte Schweiz. Diese werden zunächst mit den kommunalen Bauinvestitionen (Mittelwerte 2000–2008) auf die Ostschweizer Gemeinden heruntergerechnet, anschliessend mit der Arealstatistik (NOAS92, BFS 2001) gemäss der Baustatistik auf Siedlungsflächen (innerorts) und Strassenareale ausserorts verteilt.

Die Emissionen der industriellen Geräte, Maschinen und Fahrzeuge wurden mit den Beschäftigtenzahlen Sektor 2 aus den schweizerischen Summen auf die Ostschweiz heruntergerechnet und verteilt.

2.4. HAUSHALTE UND DIENSTLEISTUNGEN

2.4.1. STATIONÄRE QUELLEN

Die Feuerungen für Haushalte und Gewerbe, Dienstleistungen wurden von OSTLUFT in einem eigenen Modell „Wärmeverbrauch und Feuerungen pro Gemeinde“ (OSTLUFT 2011) berechnet. Das Modell berechnet die Emissionen für alle Gemeinden der Schweiz und wird auf den Energieverbrauch der Schweiz gemäss Gesamtenergiestatistik des Bundesamts für Energie kalibriert.

2.4.2. MOBILE QUELLEN

Die Emissionen der mobilen Quellen (Garten, Hobby) stammen aus Schöffeler/Keller (2008) für die ganze Schweiz 2005–2020 und werden mit Hilfe der kommunalen Einwohnerzahlen („Wohnbevölkerung“) auf die Ostschweiz umgelegt.

2.5. LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT

2.5.1. LANDWIRTSCHAFT

Die Emissionen wurden von OSTLUFT nach Quellen unterteilt: Feuerungen, Fahrzeuge/Maschinen, landwirtschaftliche Nutzflächen, offene Verbrennung, Böden und Nutztiere. Die schweizerischen Totale (FOEN 2011a, Schöffeler/Keller 2008) werden mit kommunalen Arbeitsplatzzahlen, Fahrzeugbeständen, Flächen, Tierbeständen und mit der Arealstatistik (NOAS92, BFS 2001) auf die Ostschweiz umgelegt.

2.5.2. FORSTWIRTSCHAFT

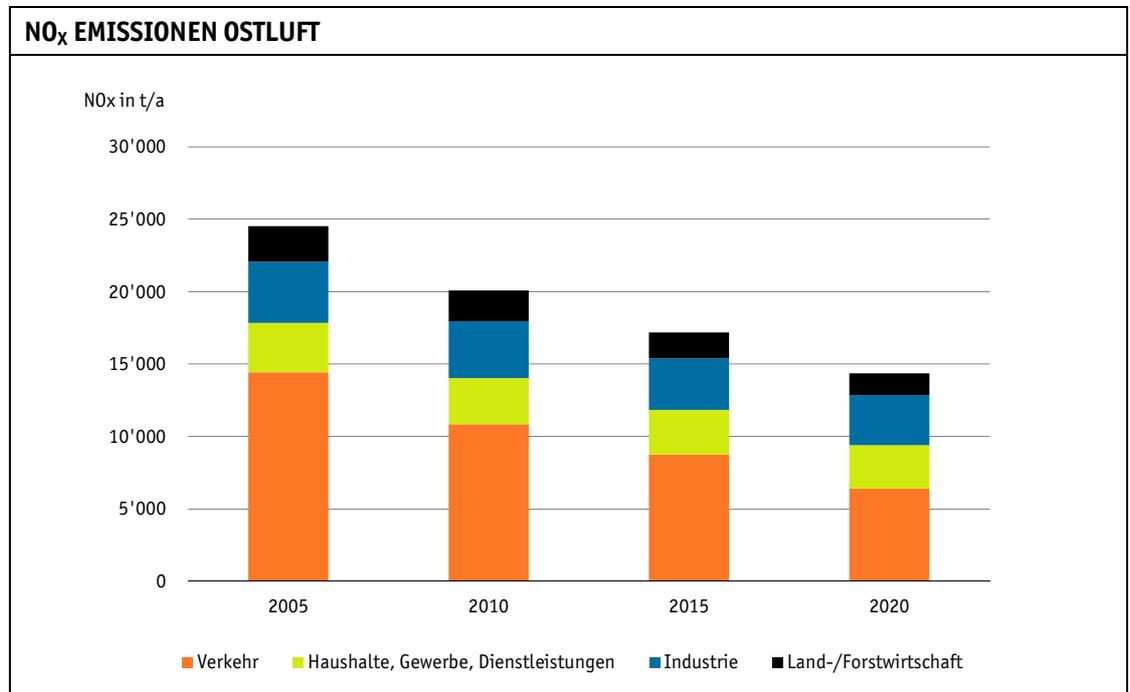
Die Emissionen aus forstwirtschaftlichen Geräten und Maschinen wurden von OSTLUFT mit kommunalen Beschäftigtenzahlen Sektor 1 auf die Gemeinden der Ostschweiz aufgeschlüsselt und mit der Arealstatistik auf den Waldflächen verteilt.

2.6. NO_x-EMISSIONSBILANZ UND EMISSIONSKARTEN

2.6.1. EMISSIONSBILANZ

Sektor	Emissionsquelle	2005	2010	2015	2020
Verkehr		14'420	10'830	8'756	6'404
	Strassenverkehr Link hot	10'796	7'792	6'271	4'436
	Strassenverkehr Tunnel Kamin	34	27	23	17
	Strassenverkehr Tunnel Portal	234	340	277	197
	Zonenverkehr hot	1'328	1'072	893	619
	Zonenverkehr Start	1'012	574	302	185
	Schiene	154	131	93	68
	Schiene Ausland	5	4	3	2
	Schiffe	370	341	275	207
	Luftfahrt (nur zivil)	487	547	618	673
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen		3'416	3'188	3'082	3'003
	HH, Gew., DL, 20m	2'270	2'030	1'885	1'763
	HH, Gew., DL, 50m	483	426	395	369
	HH, Gew, DL Holz	643	712	781	851
	Garten, Hobby	20	20	20	20
Industrie		4'226	3'936	3'558	3'447
	Baumaschinen	1'201	764	443	215
	Industrielle Fahrzeuge	345	253	182	136
	Industrie, Flächenquellen	868	1'082	1'097	1'259
	Industrie, Punktquellen bis 80m	851	941	941	941
	Industrie, Punktquellen >= 80m	961	895	895	895
Land-/Forstwirtschaft		2'454	2'125	1'783	1'503
	Landwirtschaftl. Fhrz	1'277	974	676	425
	Forstwirtschaftl. Fhrz.	63	46	27	13
	Landwirtschaft, Feuerungen	17	17	20	22
	Landwirtschaft, Tiere, Kulturen, Böden	1'038	1'028	1'000	982
	Landwirtschaft, offene Verbrennung	30	30	30	30
	Forstwirtschaft, offene Verbrennung	30	30	30	30
Total OSTLUFT		24'516	20'078	17'179	14'357
Total OSTLUFT in %		100%	82%	70%	59%

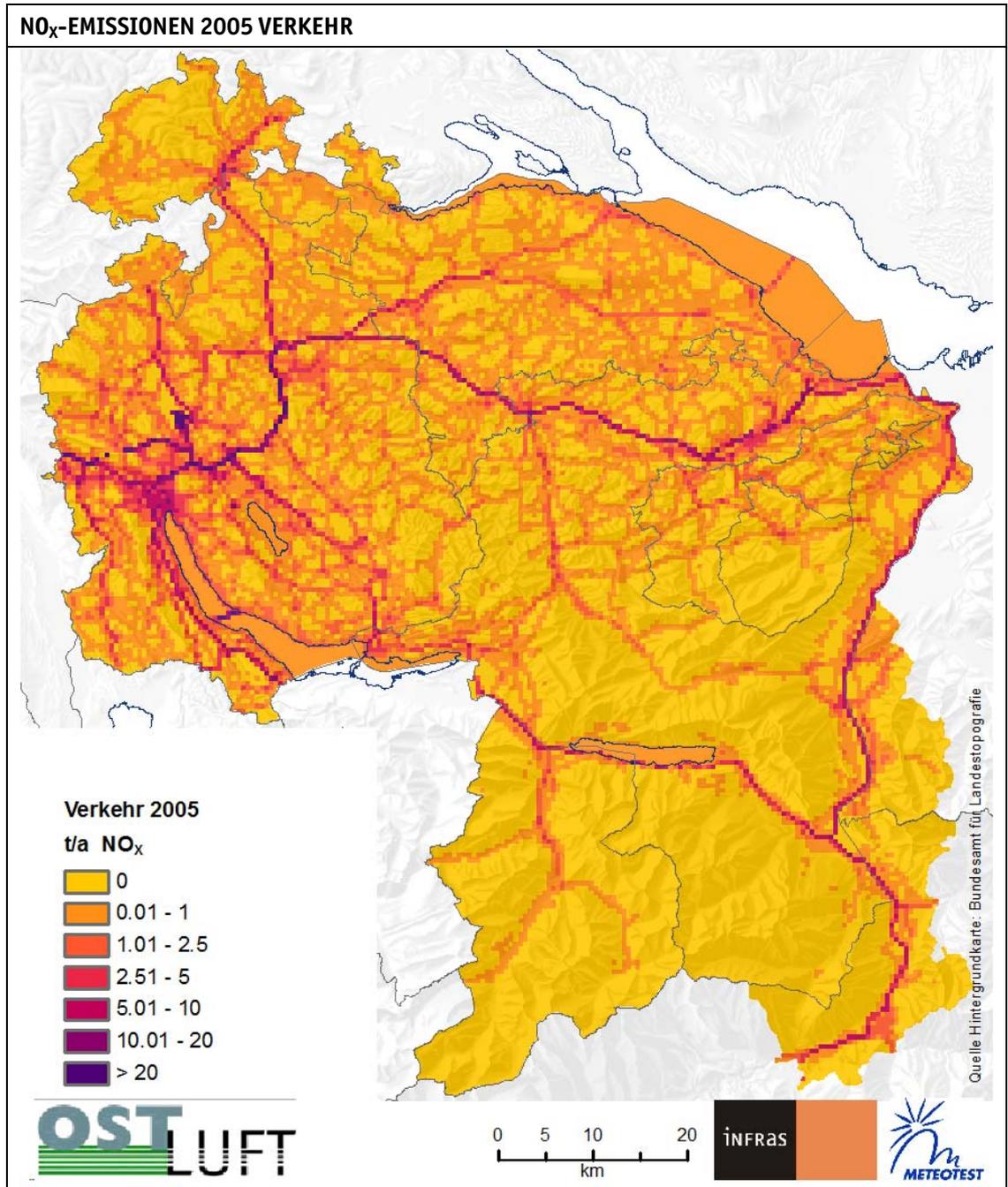
Tabelle 3 Emissionen in Tonnen NO_x (als NO₂-Äquivalente) aus dem OSTLUFT-Gebiet 2005–2020. HH= Haushalte, Gew. = Gewerbe, DL = Dienstleistungen. Die Unterscheidung nach Höhen (z.B. bei den Haushalts- und Dienstleistungsfeuerungen) dient der Immissionsmodellierung.



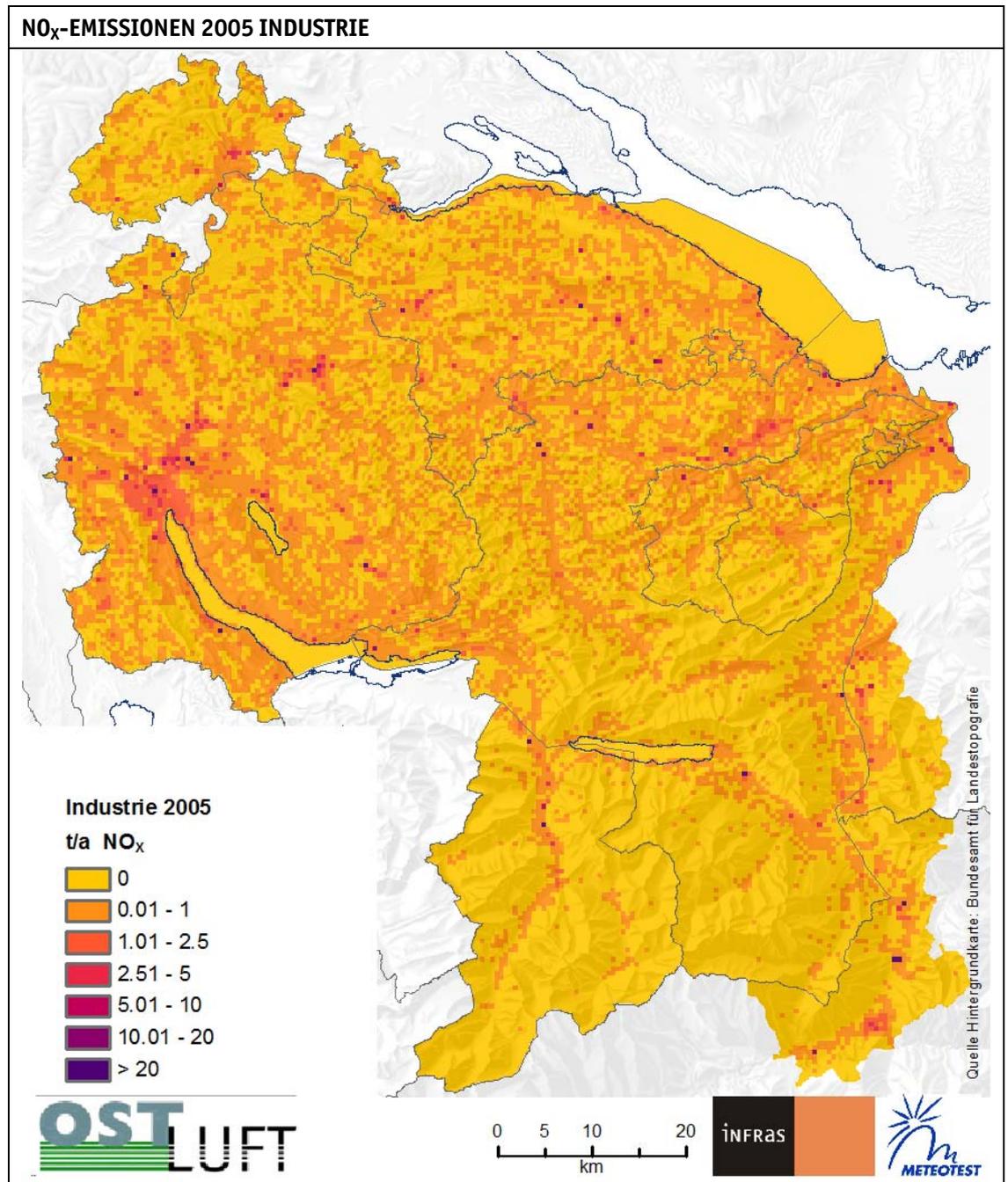
Figur 3 Entwicklung der NO_x-Emissionen 2005–2020 nach den vier Sektoren.

2.6.2. EMISSIONSKARTEN

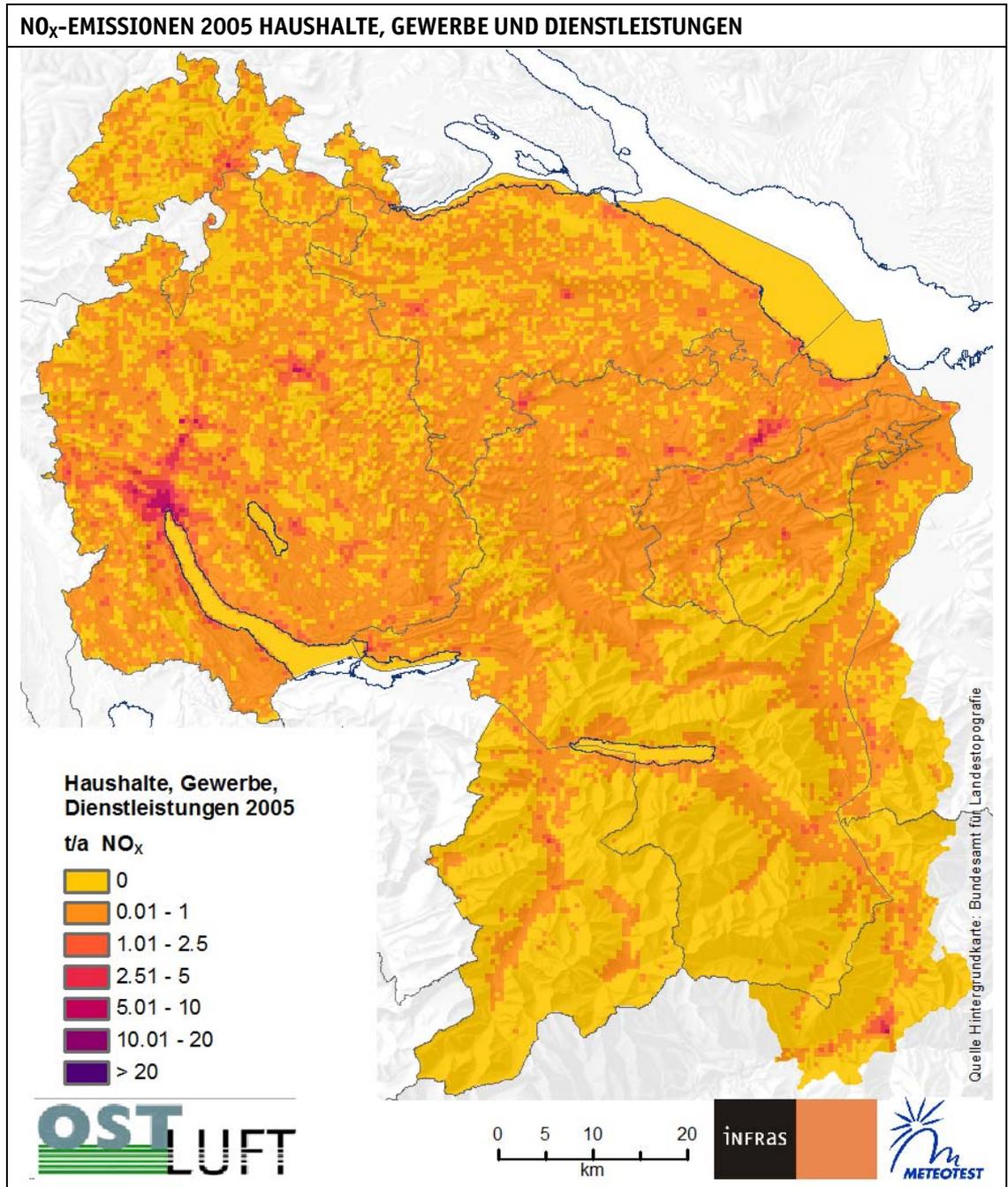
Die folgenden Figuren zeigen die NO_x-Emissionskarten 2005 der vier Hauptsektoren sowie die Emissionstotale 2005, 2010, 2015, 2020. Alle Konzentrationen sind in Tonnen pro Jahr und pro km² angegeben.



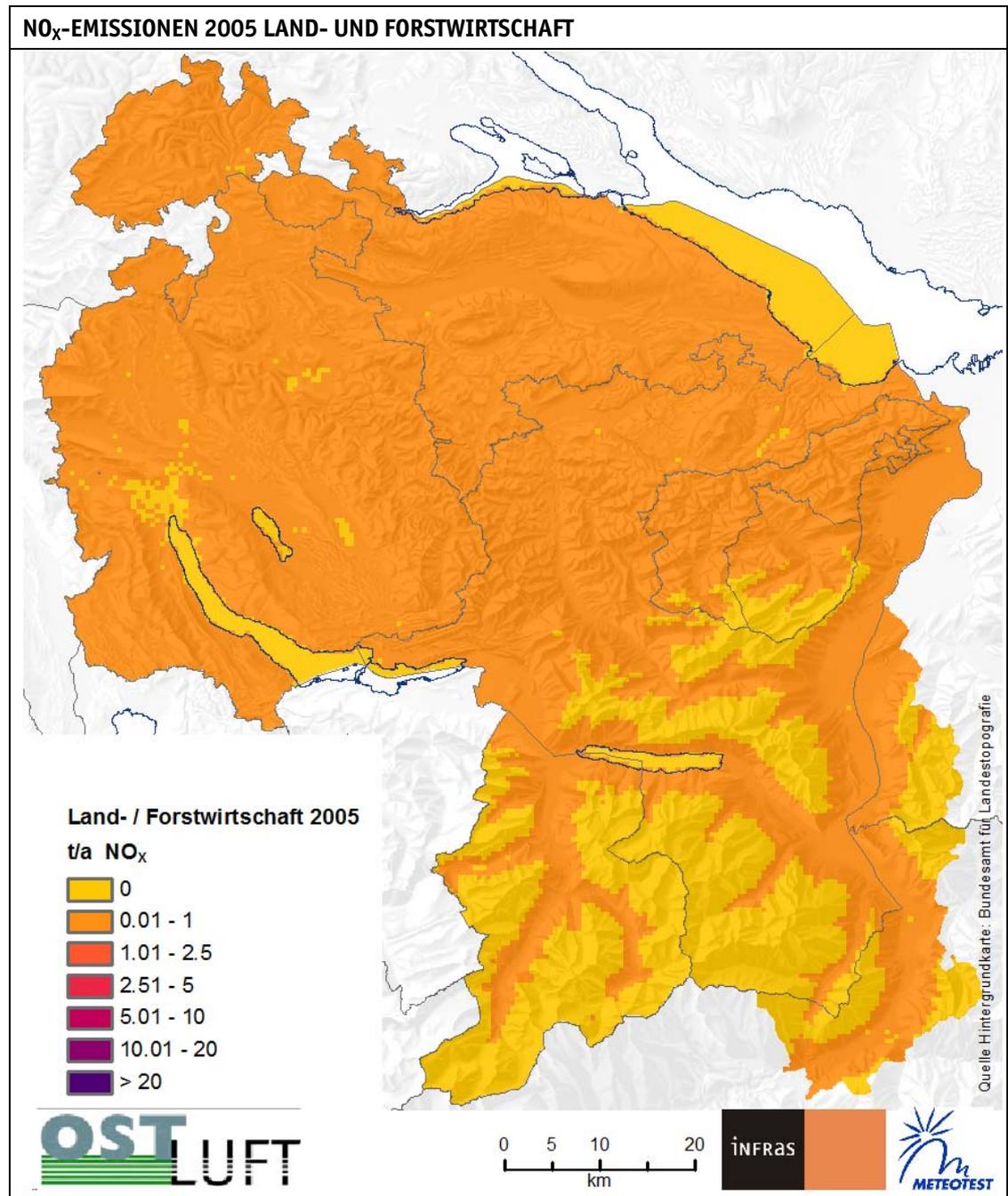
Figur 4 Verkehrsemissionen 2005 (Strassen-, Schienen, Schiffs-, Flugverkehr). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



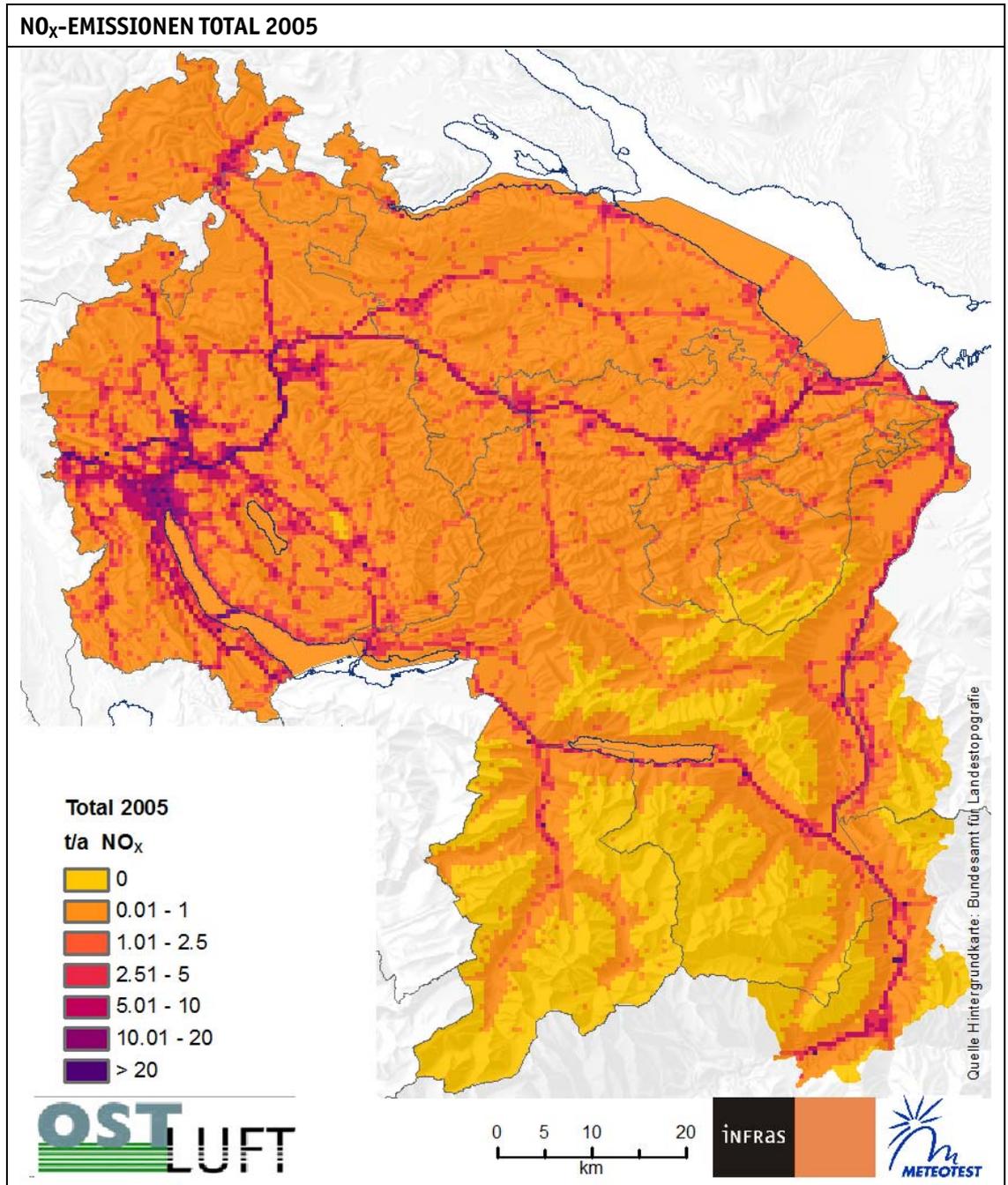
Figur 5 Industrieemissionen 2005. Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



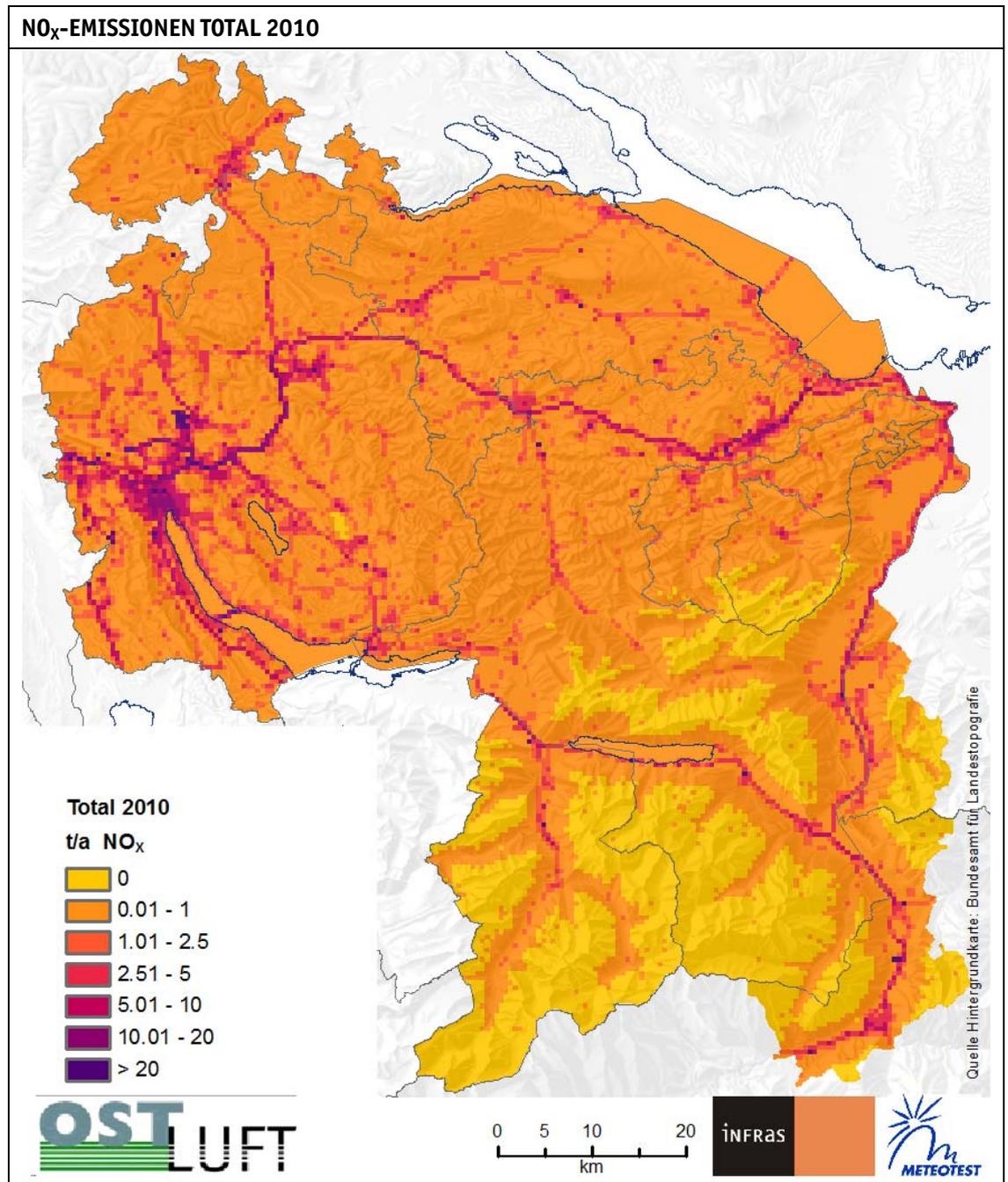
Figur 6 Haushalte-, Gewerbe- und Dienstleistungsemissionen 2005. Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



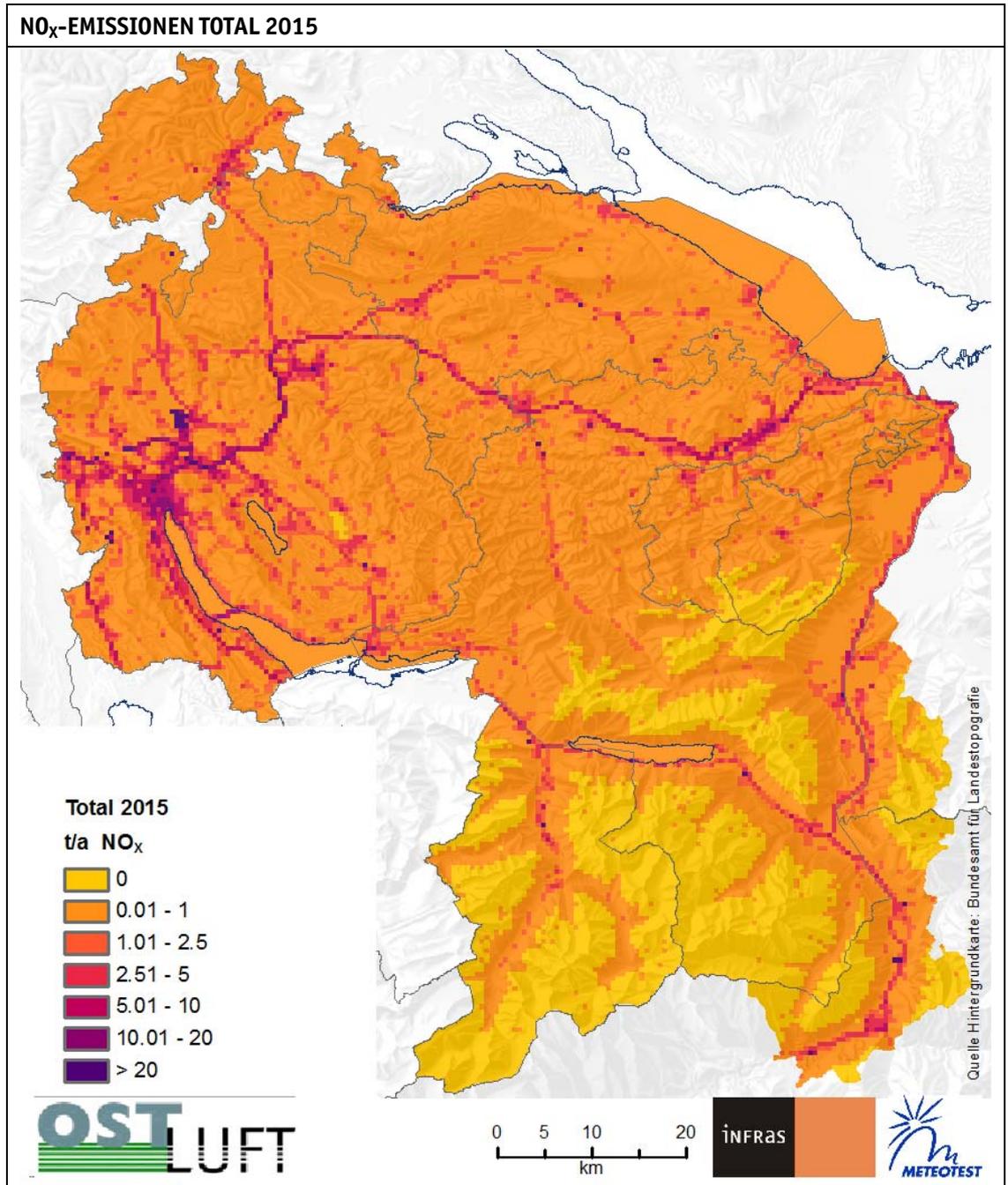
Figur 7 Emissionen Land- und Forstwirtschaft 2005. Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



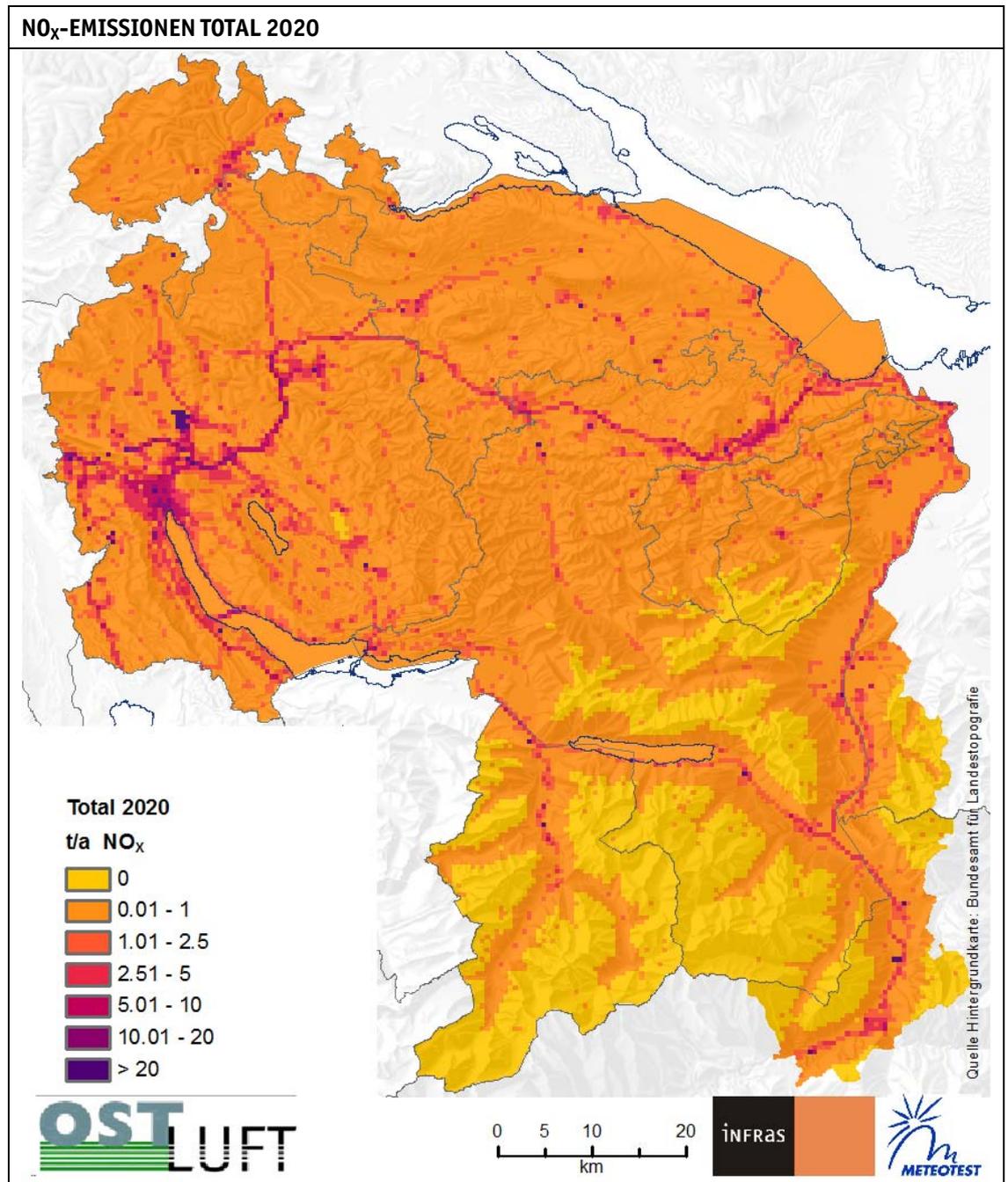
Figur 8 Emissionstotal 2005. Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



Figur 9 Emissionstotal 2010. Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



Figur 10 Emissionstotal 2015. Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



Figur 11 Emissionstotal 2020. Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.

3. IMMISSIONSMODELLIERUNG

3.1. MODELLKONZEPT

Die OSTLUFT Modellapplikation basiert auf demselben Konzept wie die neueste Applikation für die Schweiz (FOEN 2011b), die seit der ersten Version AWEL (1996) und BUWAL (1997) schrittweise verbessert und ausgebaut wurde (OSTLUFT 2003, SAEFL 2004, LHA/AFU 2005). Neben der Modellierung von NO_2 -Immissionen wird sie in modifizierter Form auch zur Modellierung von Feinstaubimmissionen verwendet (BUWAL 1999, SAEFL 2003, LHA/AFU 2005, OSTLUFT 2007).

Die Details der aktuellen Modellierung sind in FOEN (2011b) beschrieben, an dieser Stelle soll nur noch eine kurze Übersicht zur Modellierung gegeben werden. Einzelne Details der Modellierung wurden für die OSTLUFT-Applikation angepasst. Diese Spezialitäten sind weiter unten beschrieben.

Grundzüge:

- › Das Modell verwendet den Schadstoff NO_x (ausgedrückt in NO_2 -Äquivalenten) als die Summe von NO und NO_2 .
- › Die NO_x -Emissionen sind Input in das Modell und werden mittels Ausbreitungsrechnung zuerst in NO_x -Immissionen verwandelt und anschliessend in NO_2 -Immissionen transformiert.
- › Alle Modellierungsschritte werden in Hektarauflösung (100 m x 100 m) durchgeführt.
- › Um die Schadstoffimporte in das OSTLUFT-Gebiet berücksichtigen zu können, wird ein NO_x -Hintergrund addiert. Er wird aus sämtlichen Emissionsquellen der umliegenden Schweiz und des Auslands gespeist.
- › Für die Transformation des NO_x -Immissionstotalis in eine NO_2 -Immission wird eine empirische Funktion nach Romberg (1996) und Bächlin (2006) verwendet. Bächlin empfiehlt, diese dynamisch zu gestalten, ohne allerdings eine Vorschrift dafür anzugeben. Für die vorliegende Applikation wird eine empirische Zeitentwicklung verwendet.

Im Vergleich zur früheren Modellierung (OSTLUFT 2003) wurden folgende Neuerungen umgesetzt:

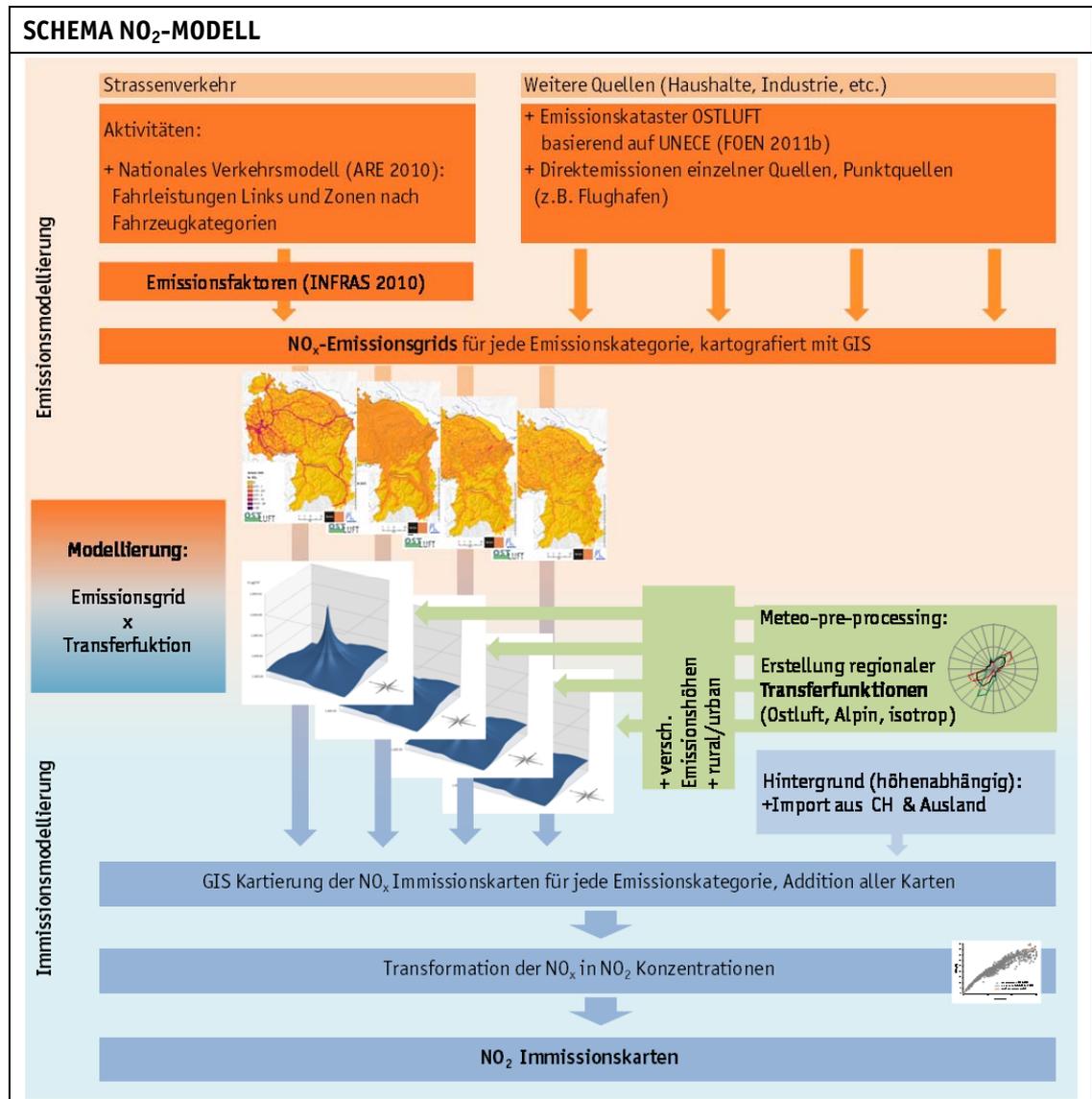
- › Neues Verkehrsmodell (VM-UVEK).
- › Aktualisierte Emissionskataster inkl. modifizierte räumliche Verteilung der Zonenemissionen des Verkehrs.
- › Aktualisierung der Ausbreitungsrechnung mit Meteodaten für das Jahr 2005.

- › Verbesserte Ausbreitungsrechnung innerorts für bodennahe Quellen (Verkehr, Offroad) zur Berücksichtigung der eingeschränkten Ausbreitung in Siedlungsraum.
- › Neue Kalibration des NO_x-Hintergrunds.
- › Verbesserte Umrechnungsfunktion von NO_x in NO₂ mit Zeitentwicklung.
- › Verdoppelung des Perimeters für Ausbreitungsrechnung (neu 20 km x 20 km anstelle von 10 km x 10 km.).
- › Verfeinerung der Ausbreitungsrechnung im St.Galler Rheintal.

Im Vergleich zur schweizerischen Applikation (FOEN 2011b) gibt es zudem folgende Adaptionen des Modelles:

- › Berücksichtigung von hohen Punktquellen mit eigenen Transferfunktionen.
- › Zeitabhängige NO_x-NO₂-Umwandlungsfunktion.
- › Spezifische Modellierung von Immissionen an Tunnelportalen und Tunnelabluftkaminen.

Die folgende Figur zeigt schematisch die Modellierungsschritte.



Figur 12 Schematische Darstellung der einzelnen Modellierungsschritte des OSTLUFT Modelles.

3.2. AUSBREITUNGSRECHNUNG

3.2.1. PRINZIP

Für die Ausbreitungsrechnung wird in einem Vorprozess ein Set von Transferfunktionen in Hektarauflösung bereitgestellt. Für mehrere Geometrien (Punkt-, Linien, Flächenquellen; verschiedene Emissionshöhen zwischen 0 m und 100 m, Ganglinien für Verkehr, Raumwärme, Industrie) wird mit stündlichen Meteodaten für das Jahr 2005 und mit einer Einheitsemission (1 t/a) eine Gaussmodellierung durchgeführt. Zusätzlich wird das Untersuchungsgebiet in verschiedene Windregionen mit unterschiedlichen Meteodaten (v.a. Windrichtungen) unterteilt. Die Emission

erfolgt nicht konstant, sondern nach Ganglinien. Bodennahe Quellen (Verkehr) folgen im Wesentlichen den Tagesganglinien des Verkehrs, erhöhte Quellen (Heizungen) folgen Tagesganglinien, die saisonal verschieden sind. Details siehe FOEN (2011b) in Annex 3. Ergebnis der Ausbreitungsrechnung sind räumliche Muster mit einer Ausdehnung von 20.1 km x 20.1 km in deren zentrale Hektare eine Emissionsquelle steht (mehrere Emissionsquellen im Falle von Linien- und Flächenquellen). Von der zentralen Hektare aus, werden die NO_x-Emissionen über 10 km in jede Himmelsrichtung ausgebreitet (jede Matrix enthält somit 201 x 201 = 40'401 Zellen). Jedes Muster wird seinem passenden Emissionsgrid zugeordnet und damit „multipliziert“: Das Muster „Punktquellen >100 m“ wird mit dem Emissionsgrid aller Punktquellen mit Kaminhöhen > 100 m (z.B. KVA) multipliziert etc. Auf diese Weise wird jedes NO_x-Emissionsgrid in ein NO_x-Immissionsgrid umgelegt.

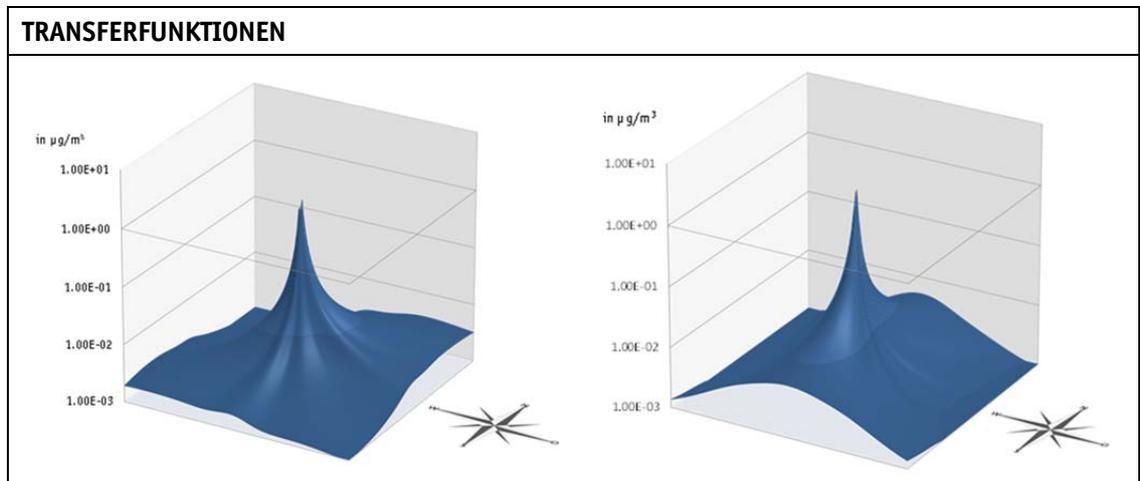
3.2.2. METEOROLOGIE

Die Transferfunktionen werden mit einem Gauss'schen Dispersionsmodell in der Version gemäss TA Luft (BMJ 1987) erzeugt. Die wichtigsten Inputvariablen für die Berechnung der Transferfunktionen sind die Meteodaten aus dem Jahr 2005, die Emissionshöhen sowie die Quellenart. In jeder Windregion werden die passenden Transferfunktionen angewendet, basierend auf ihren charakteristischen Windrosen und weiterer Meteodaten wie Windgeschwindigkeit, Temperatur, Höhe der Mischungsschicht und TA-Luft Stabilitätsklassen.

Folgende drei Gebietskategorien („Windregionen“) mit eigenen Meteorologien wurden für das OSTLUFT-Gebiet verwendet:

- › Für die Flachlandmeteorologie „Mittelland“ werden die Transferfunktionen aus dem Schweizer Modell (FOEN 2011b) verwendet, die aus den Messdaten der ANETZ-Stationen Genf (GE), Payerne (FR), Wynigen (BE), Zürich-Kloten (ZH) und Güttingen (TG) gewonnen werden.
- › In den Alpentälern werden die Transferfunktionen mit Messdaten alpiner ANETZ-Stationen erzeugt, Sion (VS), Magadino (TI) und Chur (GR) und entlang der Haupttalachse ausgerichtet (Kanalisation).
- › Für die restlichen Regionen – mehrheitlich hochgelegene alpine Gebiete und voralpine Hügellagen – werden isotrope (rotationssymmetrische) Windrichtungen angenommen. Die Transferfunktion wird aus der Mittelland-Transferfunktion durch Mittelung der über alle Richtungen erzeugt.

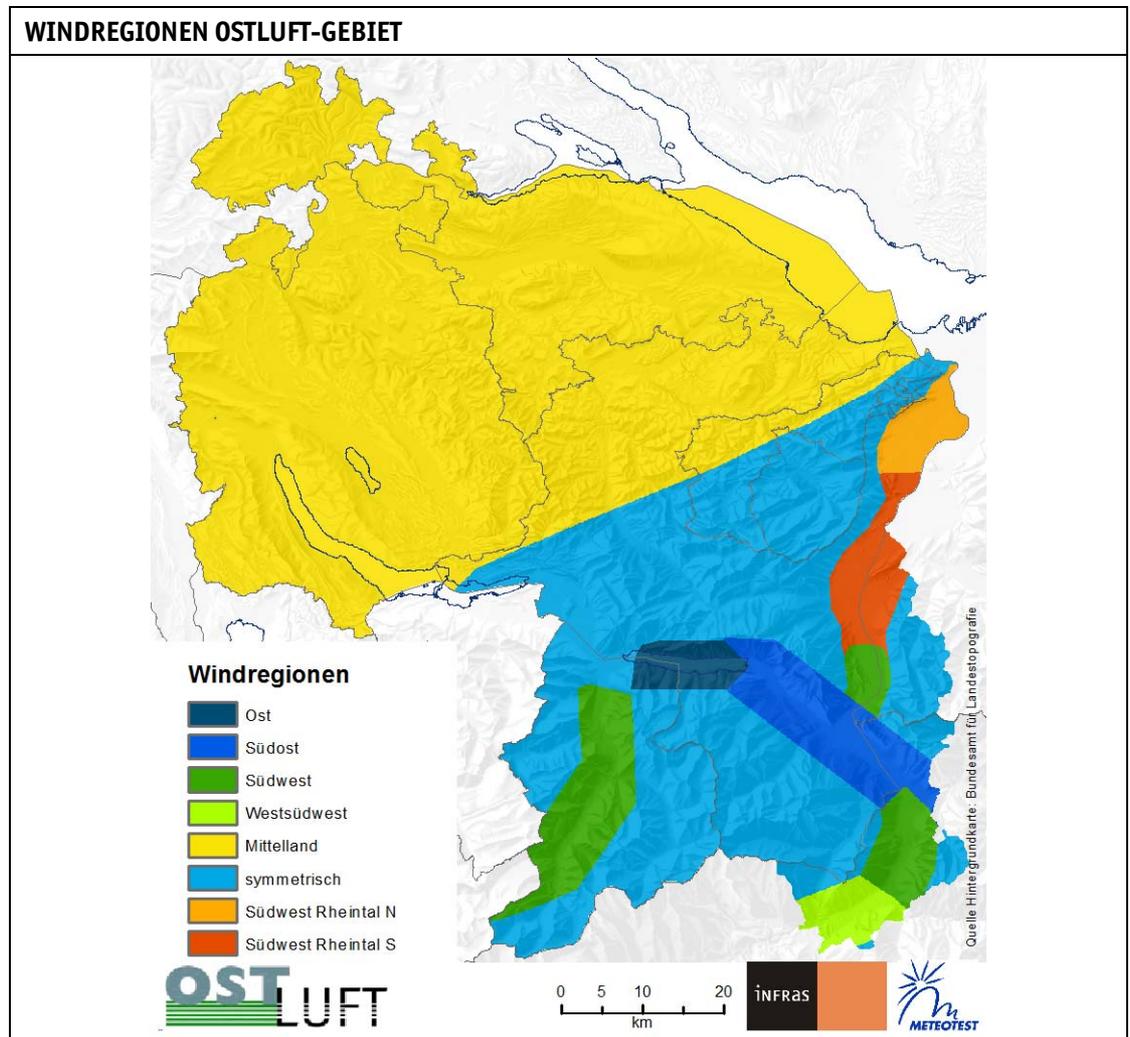
Figur 13 zeigt illustrativ Transferfunktionen für eine Mittelland- und eine alpine Situation.



Figur 13 Beispiel einer Mittelland- (links) und einer alpinen (rechts) Transferfunktion für eine Quelle (1 t NO_x pro Jahr) die auf 12 m Emissionshöhe im Zentrum lokalisiert ist. Die horizontalen Achsen erstrecken sich über je 20 km (400 km²). Die räumliche Auflösung beträgt 100 m x 100 m (ha). Die vertikale Achse gibt die NO_x-Konzentration in µg/m³ an.

Die folgende Figur zeigt die Einteilung des OSTLUFT-Perimeters in verschiedene Windregionen. Der nördliche Teil der Ostschweiz mit den Kantonen SH, ZH, TG, teilweise SG ist der Windregion „Mittelland Ostschweiz“ zugeordnet und ist in der Figur gelb markiert. Die Tallagen im Linthal, Glarus, im Rheintal und im Seeztal werden als Alpentäler behandelt, wobei die Windrichtungen jeweils der Lage der Talrichtung angepasst werden. Zudem wurden aufgrund der speziellen Situation des unteren, breiten Rheintales zwei neue zusätzliche „Misch“-Transferfunktionen angewendet. Diese bestehen aus einer Mischung von Alpental und symmetrischer Ausbreitung: Rheintal N: 50% alpin / 50% symmetrisch, Rheintal S: 70% alpin / 30% symmetrisch.

Alle übrigen Flächen werden der Kategorie „restliche Gebiete“ mit symmetrischer Ausbreitung zugeordnet und sind in der Figur hellblau markiert.



Figur 14 Definition der Windregionen des OSTLUFT Gebietes.

3.2.3. EMISSIONSHÖHE/ QUELLENTYP

Transferfunktionen werden neben der Unterscheidung in Windregionen auch noch nach quellen-spezifischen Unterschieden erstellt. Es werden folgende Emissionshöhen (Kaminhöhe plus Fahnenüberhöhung) unterschieden:

- › 0–2 m für Linien- und Flächenquellen des Strassen- und Offroad-Verkehrs und der Land-/Forstwirtschaft),
- › 2–20 m, 20–50 m für Flächenquellen Feuerungen, das heisst für Haushalte, Industrie, Gewerbe, Dienstleistungen, Tunnelportale und Abluftkamine von Strassentunnels,
- › 50–80 m, >80 m für Punktquellen mit bedeutenden Emissionsfrachten aus Industrie und Gewerbe.

Weiter werden für Punkt-, Linien- und Flächenquellen unterschiedliche Transferfunktionen mit folgender Geometrie verwendet:

- › Für eine einzelne Punktquelle wird diese in der Mitte der zentralen Hektare platziert. Für die Berechnung der Transferfunktion wird die Emissionsstärke auf 1 t/a NO_x (Einheitsemission für alle Transferfunktionen) festgelegt. In der Ausbreitungsrechnung wird dann die effektive Emission je Hektare mit den Werten der Transferfunktion multipliziert.
- › Für Linienquellen (Strassen in Alpentälern) werden vier Punktquellen in einer geraden Linie hintereinander durch die Mitte der zentralen Hektare aufgestellt (Linienquelle in Talhaupt-richtung). Dabei erhält jede der vier Quellen ein Viertel der Einheitsemission (je 0.25 t/a NO_x).
- › Für Flächenquellen (Strassen im Mittelland, Haushalte, Industrie, Gewerbe, Dienstleistungen, Offroad-Verkehr, Land- und Forstwirtschaft) werden vier Punktquellen in einer Hektare gleichmässig verteilt, weil es sich bei diesen Quellen im Kataster de facto um eine nicht näher definierbare Zusammenstellung von dispersen Einzelquellen ohne spezifische räumliche Ausrichtung handelt. Dabei erhält wiederum jede der vier Quellen ein Viertel der Einheitsemission (je 0.25 t/a NO_x).

3.2.4. SCHADSTOFFAUSBREITUNG INNERORTS

Für die Schadstoffausbreitung innerorts mit behinderter Durchlüftung (durch Gebäude und Überbauungen) werden die Transferfunktionen modifiziert. Die Emissionskataster werden deshalb in innerorts- und ausserorts-Gebiete unterteilt. Zu diesem Zweck wird eine geeignete Maske im GIS erzeugt. Diese basiert auf dem Datensatz des Bundesamts für Statistik BFS „Bauzonen Schweiz“.

- › Um eine innerorts Ausbreitung einer Emissionsquelle auf 2–20 m zu simulieren (Feuerungen Haushalte und Gewerbe) wird die Transferfunktion mit einem Faktor 1.1 erhöht.
- › Für bodennahe Quellen (Strassenverkehr, Bau- und Industriemaschinen) wird die ausserorts Transferfunktion mit Emissionshöhe 0–2 m mit einer innerorts Transferfunktion überlagert, die nur gerade in der zentralen Hektare einen von null verschiedenen Wert besitzt. Die erste Transferfunktion repräsentiert den Anteil, der die Emissionen zum städtischen Hintergrund beiträgt, während die zweite Transferfunktion den lokalen Effekt einer Quelle abbildet, deren Emission durch die dichte Bebauung gefangen bleibt. Die beiden Funktionen werden gewichtet gemittelt, die erste Transferfunktion mit Gewicht 2, die zweite mit Gewicht 1.

3.2.5. ZUORDNUNG VON QUELLEN ZU DEN TRANSFERFUNKTIONEN

Jedes Emissionsgrid/Emittentengruppe wird mit „seiner“ spezifischen Transferfunktionen (Höhe, Quellenart, Meteorologie, innerorts/ausserorts) in ein Immissionsgrid umgelegt. Pro Windregion steht ein vollständiger Satz von Transferfunktionen zur Verfügung. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die verwendeten Transferfunktionen.

SPEZIFIKATIONEN DER VERWENDETEN TRANSFERFUNKTIONEN				
Emissionshöhe	Quellentyp	Meteo	Quellen innerorts	Quellen ausserorts
2 m	Linien-/Flächenquelle	Alpin, Mittelland symmetrisch	Link-, Zonenverkehr, Baumaschinen, Industriefzge., Garten & Hobby	Linkverkehr, Grenzgebiet, Baumaschinen, Land-/Forstw. Maschinen
12 m	Punktquelle	Alpin, Mittelland symmetrisch	Tunnelportale Verkehr	Tunnelportale Verkehr
12 m	Flächenquelle	Alpin, Mittelland symmetrisch	Feuerungen (HH, DL, Industrie, Landwirtschaft, Holzfeu.), Feuerungen Grenzgebiet, Schiene	Schiffe
25 m	Flächenquelle	Alpin, Mittelland symmetrisch	Feuerungen HH/DL	Tunnelkamine Verkehr
60 m / 100 m	Punktquelle	Alpin, Mittelland symmetrisch		Industrie

Tabelle 4 Liste der verwendeten Transferfunktionen.

3.3. NO_x-HINTERGRUNDIMMISSION

Würden nur Immissionen aus der Ausbreitungsrechnung berechnet, würden keine Schadstoffverfrachtungen über Distanzen von mehr als 20 km berücksichtigt. Das entspricht nicht der Wirklichkeit, die Summe aller NO_x-Immissionsgrids wäre im Vergleich mit Messdaten zu klein. Deshalb werden die NO_x-Immissionsgrids noch mit einem weiteren Grid für den NO_x-Hintergrund ergänzt, der alle Beiträge simulieren soll, die mit der Ausbreitungsmodellierung nicht erfasst sind. Primär natürlich Importe aus den ausserhalb des OSTLUFT-Perimeters gelegenen Regionen (Schweiz, Ausland), aber auch Beiträge allfälliger Emissionsquellen, die im Emissionskataster fehlen. Für den Hintergrund wird das Modell aus der Schweizer Applikation verwendet. Es berechnet den Hintergrund höhen- und zeitabhängig.

$$NO_x(h,t) = c_0 \cdot \exp(-h/h_0) \cdot \exp(-t/t_0) \quad h \geq 400m$$

$$NO_x(h,t) = c_0 \cdot \exp(-400m/h_0) \cdot \exp(-t/t_0) \quad h < 400m$$

$$c_0 = 50.4 \mu g / m^3$$

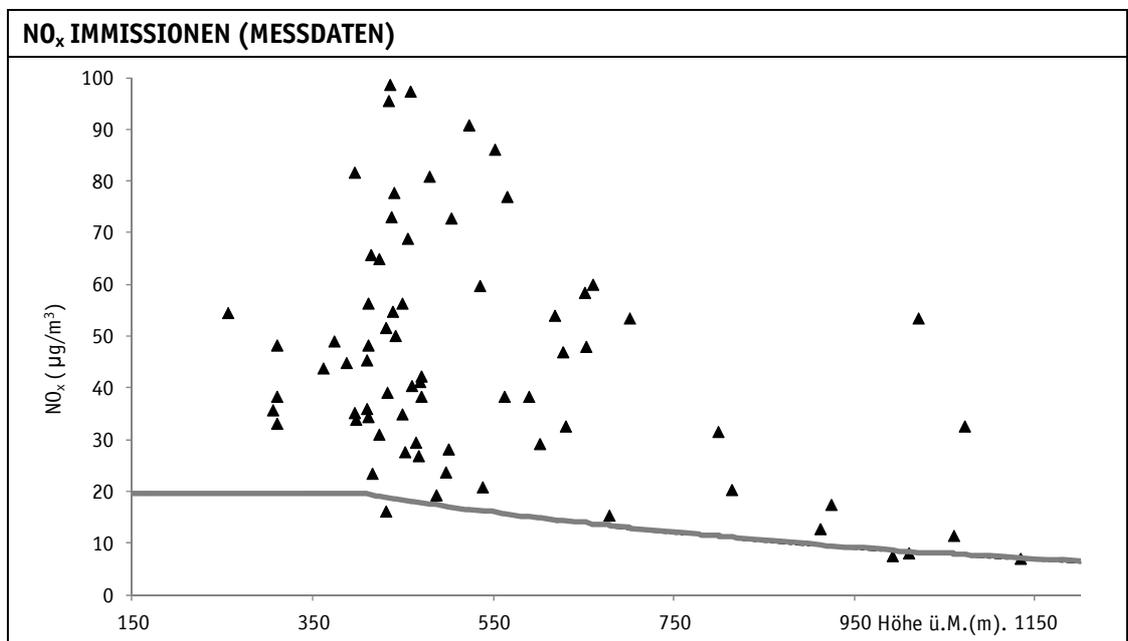
$$h_0 = 714 m$$

$$t_0 = 41.6 a$$

Die erste unabhängige Variable der Hintergrundimmission h ist die Höhe in m ü.M.,

Die zweite unabhängige Variable t nummeriert das Jahr (beginnend mit 1 bei 1990)

$$t(2005) = 16a, \quad t(2010) = 21a, \quad t(2015) = 26a, \quad t(2020) = 31a.$$



Figur 15 Gemessene NO_x-Immissionen 2005 in Funktion der Höhe über Meer. Die Linie entspricht der Modellfunktion für die Hintergrund-Immission 2005.

3.4. GRENZNAHES GEBIET

Entlang der Schweizer Grenze werden die Emissionskataster Verkehr und Haushalte/Dienstleistungen ins nahe Ausland hinaus fortgesetzt (die Emissionen auf den grenzübequerenden Strassen werden mit derselben Stärke ins Ausland hinausverlängert und in den grenznahen Siedlungsgebieten werden die Flächenemissionen der benachbarten, schweizerischen Siedlungsgebiete ins Ausland fortgesetzt) und der erweiterte Emissionskataster für die Ausbreitungsrechnung verwendet. Dadurch wird erreicht, dass die Immissionskonzentration entlang der Grenze nicht unrealistisch abfällt.

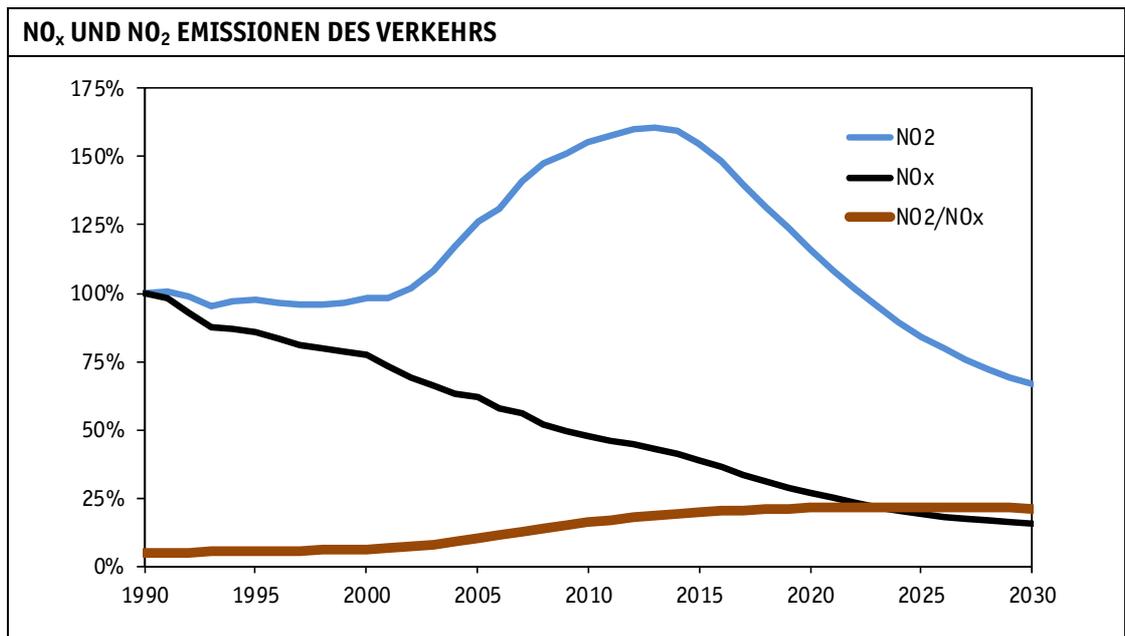
3.5. NO_x-/NO₂-UMWANDLUNG

Alle NO_x-Immissionsgrids werden addiert und ergeben zusammen jene Konzentration, die mit gemessenen NO_x-Immissionen verglichen werden kann (siehe Kap. 5.2). Das Hauptinteresse liegt aber beim NO₂, für das die Luftreinhalte-Verordnung einen Jahres-Immissionsgrenzwert vorgibt (30 µg/m³), sodass die NO_x- noch in NO₂-Immission umgewandelt werden muss. NO_x-Emissionen erfolgen zum grössten Teil in Form von NO. Ein Teil davon wird in der Atmosphäre in kurzer Zeit in NO₂ umgewandelt und erreicht rasch einen Gleichgewichtszustand zwischen NO und NO₂ („photostationäres Gleichgewicht“). Dieser ist zwar von zahlreichen Parametern abhängig, zeigt aber im Jahresmittel ein robustes Muster (siehe p. 37 in FOEN 2011b), das mit einer einfachen, analytischen Funktion approximiert werden kann. Bis anhin wurde eine Funktion von Romberg (1996) oder eine ähnliche Funktion benutzt. Seit ungefähr dem Jahr 2000 zeigen Messwerte in Strassennähe eine gewisse Dynamik der Funktion. In der von Bächlin (2006) aktualisierten Romberg-Funktion wird deshalb darauf verwiesen, dass die Parametrisierung regelmässig zu aktualisieren sei. In einer Folgepublikation derselben Forschungsgruppe wird ein erweitertes Modell vorgeschlagen (Düring 2011), das von der Annahme ausgeht, die Dynamik in der Umwandlung sei auf die Erhöhung des Emissionsverhältnisses NO₂/NO_x zurückzuführen, wie es seit der Einführung neuerer Dieselmotoren (Euro 4/5) und Oxidationskatalysatoren für Dieselmotoren tatsächlich beobachtet wird (Grice 2009).

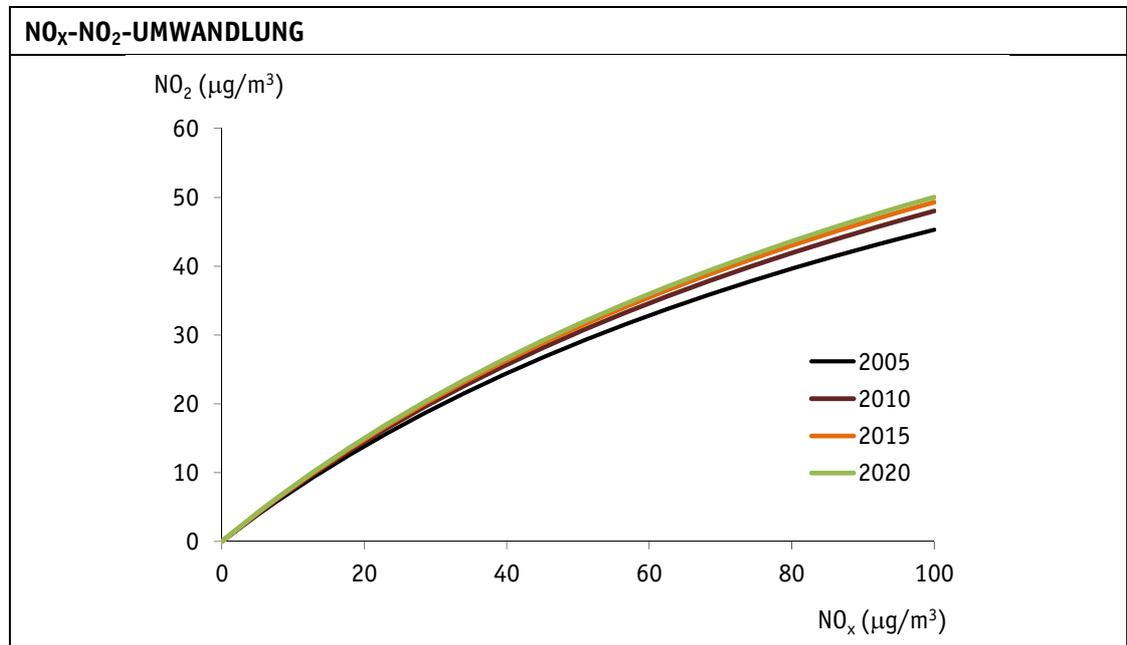
Für die OSTLUFT-Modellierung wird dieses Phänomen neu ins Modell integriert. Bächlin (2006) selber gibt noch keine Vorschrift an, wie es im Laufe der Jahre operationalisiert werden könnte. Düring (2011) schlägt zwar ein Verfahren vor, das aber relativ viele Input-Parameter erfordert und solche, die im Immissionsmodell nicht zur Verfügung stehen (z.B. Ozon-Konzentration). Ein entscheidender Input ist aber das Verhältnis NO₂/NO_x der Verkehrsemissionen. Dieses ist seit ca. 2000 am Steigen und wird aufgrund der Flottenzusammensetzung der neuen Motorfahrzeuge auch weiterhin zunehmen (bei gleichzeitiger Abnahme der NO_x-Emissionen), siehe Figur 16. Für OSTLUFT wird eine Zeitentwicklung der NO_x-NO₂-Umwandlungsfunktion angenommen, die die Qualität der bisherigen Entwicklung 2000–2010 aufnimmt und bis in Jahr 2020 (hypothetisch) fortschreibt. Analytisch wird dazu die Romberg Funktion benutzt aber mit jährlich ändernden Parametern (siehe Tabelle 5 und Figur 17)

PARAMETER NO _x -NO ₂ -UMWANDLUNG				
Parameter	2005	2010	2015	2020
A (µg/m ³)	103	110	113	115
B (µg/m ³)	130	134	135	136
C (---)	0.005	0.010	0.012	0.013

Tabelle 5 Parameter der Umwandlung von NO_x in NO₂.



Figur 16 Relativentwicklung der schweizerischen NO_x- und NO₂-Emissionen aus dem Strassenverkehr (BAFU 2010).



Figur 17 Umwandlung von NO_x in NO₂.

3.6. UMSETZUNG

Die Umsetzung der Modellrechnungen erfolgt in mehreren Schritten:

- › Jeder NO_x-Emissionskataster wird mit der zugehörigen Transferfunktion in einen NO_x-Immissionskataster umgerechnet. Alle NO_x-Immissionskataster werden addiert.
- › Zusätzlich wird der NO_x-Hintergrund addiert. Das ergibt als Zwischenresultat die gesamten NO_x-Immissionen.
- › Die gesamten NO_x-Immissionen werden mit den Messresultaten verglichen. Dabei werden Tools aus der Statistik angewendet: Prüfung der Korrelation und des Bestimmtheitsmasses, Scatterplot, Regressions- und Residuenanalyse. Treten grosse und systematische Abweichungen zwischen Modell- und Messwerten auf, wird nach den Gründen gesucht und das Modell entsprechend und iterativ verbessert.
- › Ist das Modell bezüglich NO_x-Immissionen optimiert, werden die NO₂-Immissionen berechnet.
- › Die NO₂-Immissionen werden mit den NO₂-Messresultaten (nur Monitorresultate, keine Passivsammlermessdaten) verglichen. Dabei werden dieselben Tools aus der Statistik angewendet: Korrelation, Bestimmtheitsmass, Scatterplot, Regressions- und Residuenanalyse. Treten grosse und systematische Abweichungen zwischen Modell- und Messwerten auf, wird zunächst die NO_x-NO₂-Umwandlung optimiert. Reicht diese Verbesserung nicht aus, werden auch die NO_x-

Immissionen nochmals auf Verbesserungspotenziale analysiert und ggf. verändert. Auch dieser Schritt erfolgt iterativ.

Die Transferfunktionen werden in einem eigenen FORTRAN-Programm berechnet und in die GIS-Applikation implementiert, ebenso die Emissionskataster, die als Rasterdaten vorliegen. Die Umrechnung in Immissionen ist in einer GIS-Applikation (ArcInfo, ArcGIS¹) programmiert. Für die weitere Verwendung werden die GIS-Programme (ArcInfo aml) dem OSTLUFT Modellierzentrum im AWEL in Zürich zur weiteren Benutzung geliefert.

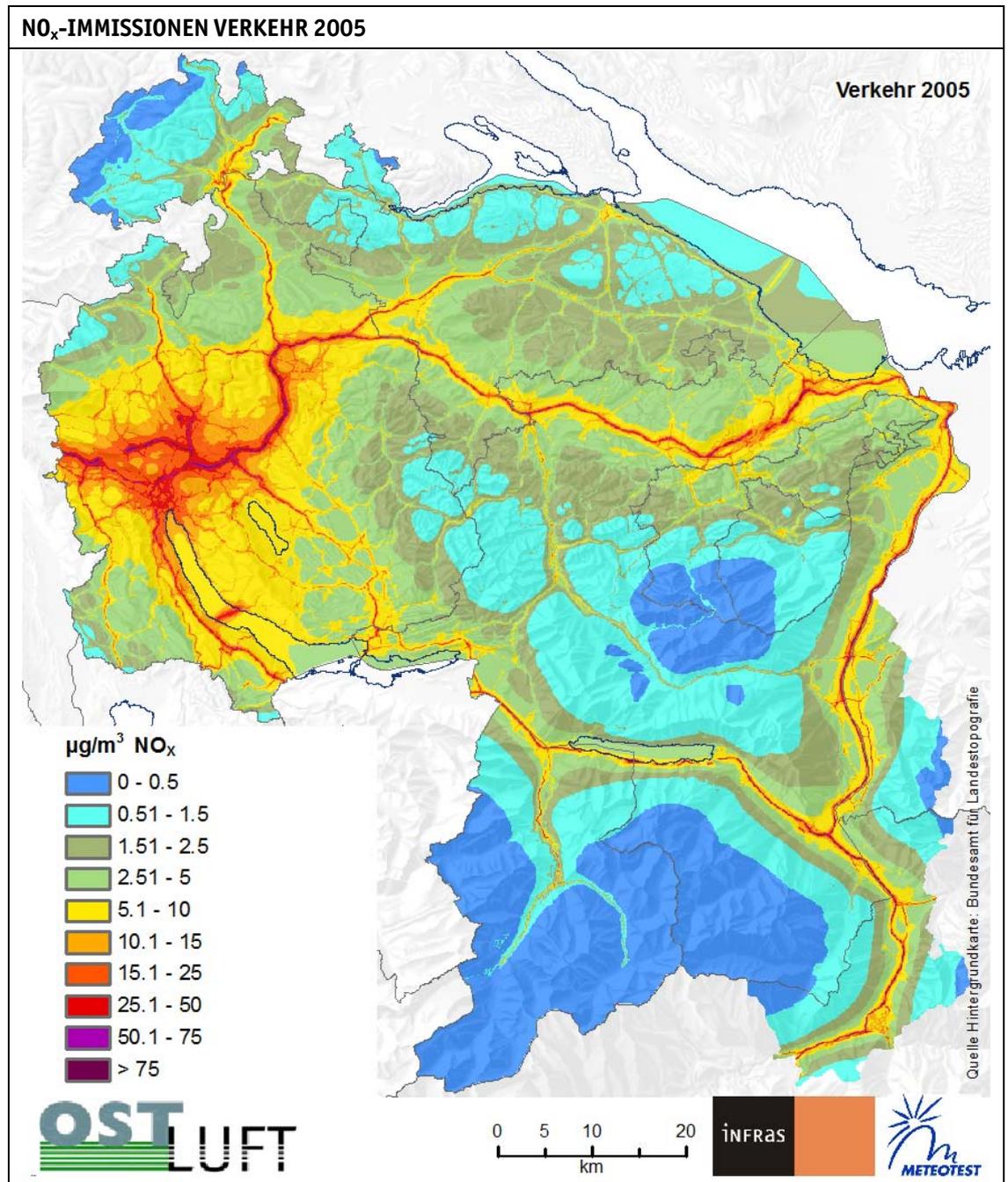
4. MODELLRESULTATE

4.1. NO_x- UND NO₂-BELASTUNGSKARTEN FÜR 2005–2020

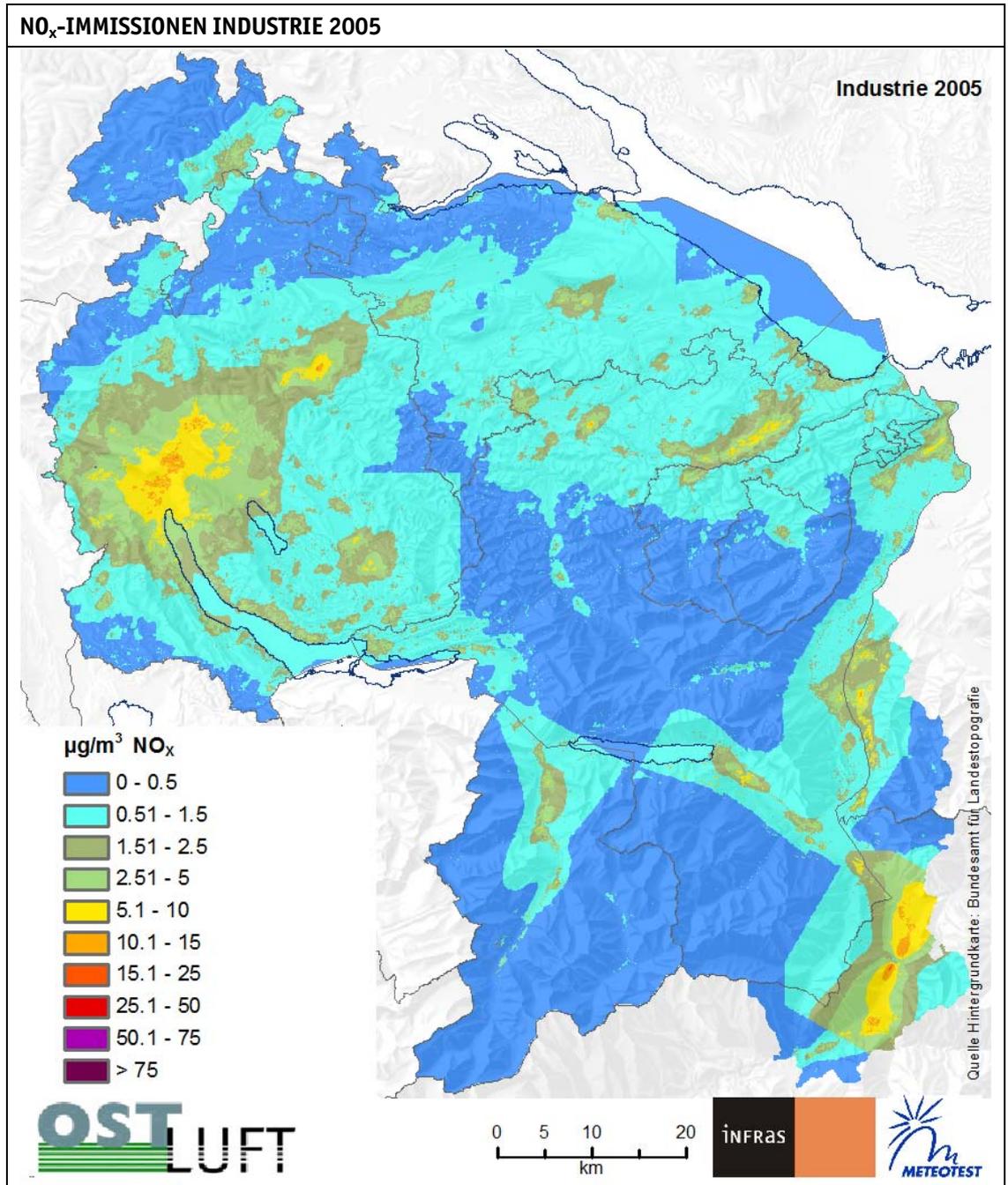
4.1.1. NO_x-BELASTUNGSKARTEN NACH SEKTOREN

Die folgenden Figuren zeigen die NO_x-Immissionskarten 2005 der vier Sektoren sowie der Hintergrundbelastung. Alle Konzentrationen sind als Jahresmittel in µg/m³ und einer Hektarauflösung dargestellt.

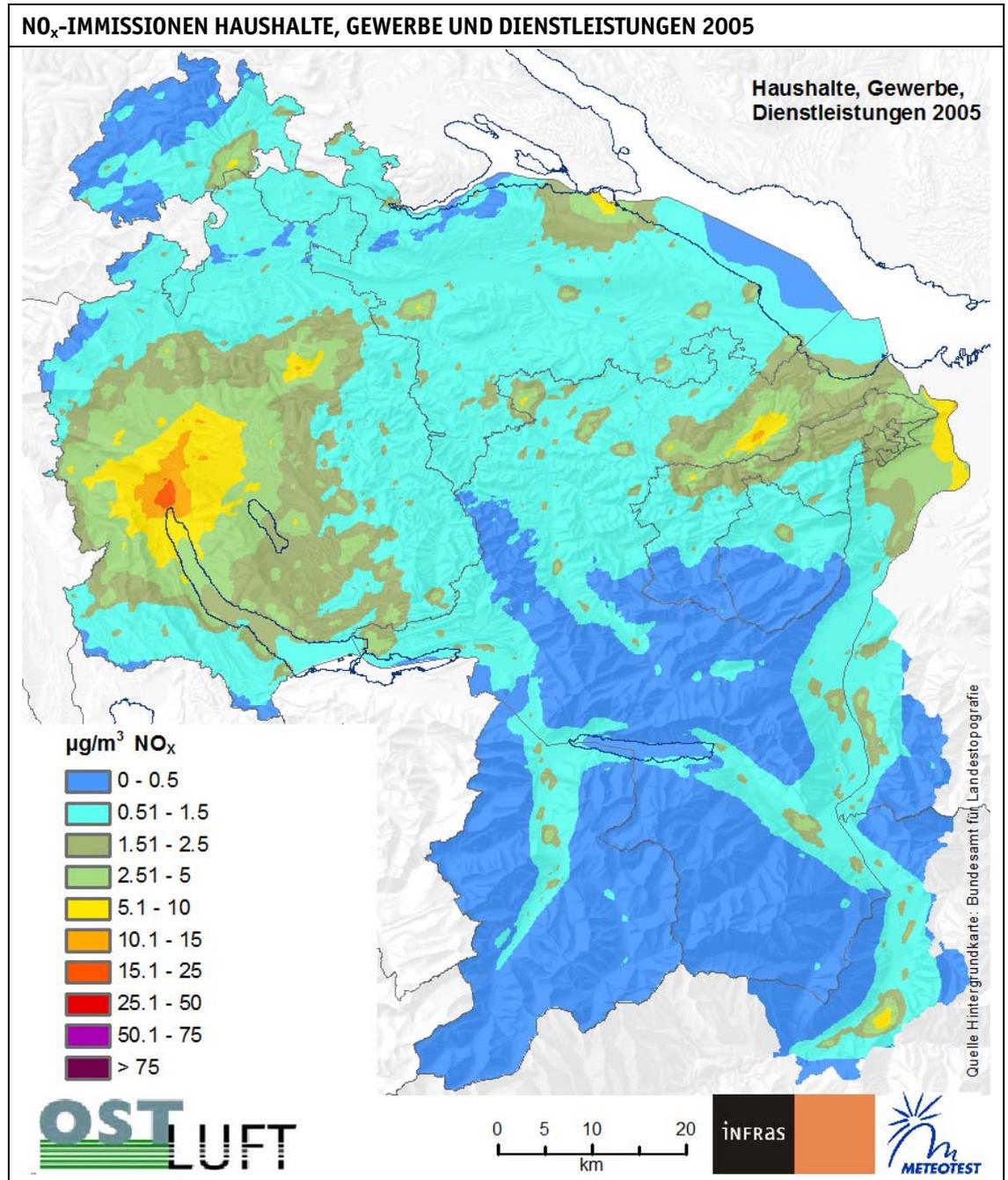
¹ ArcInfo® und ArcGIS® sind gesetzlich geschützte Marken von Esri Inc., Redlands, USA



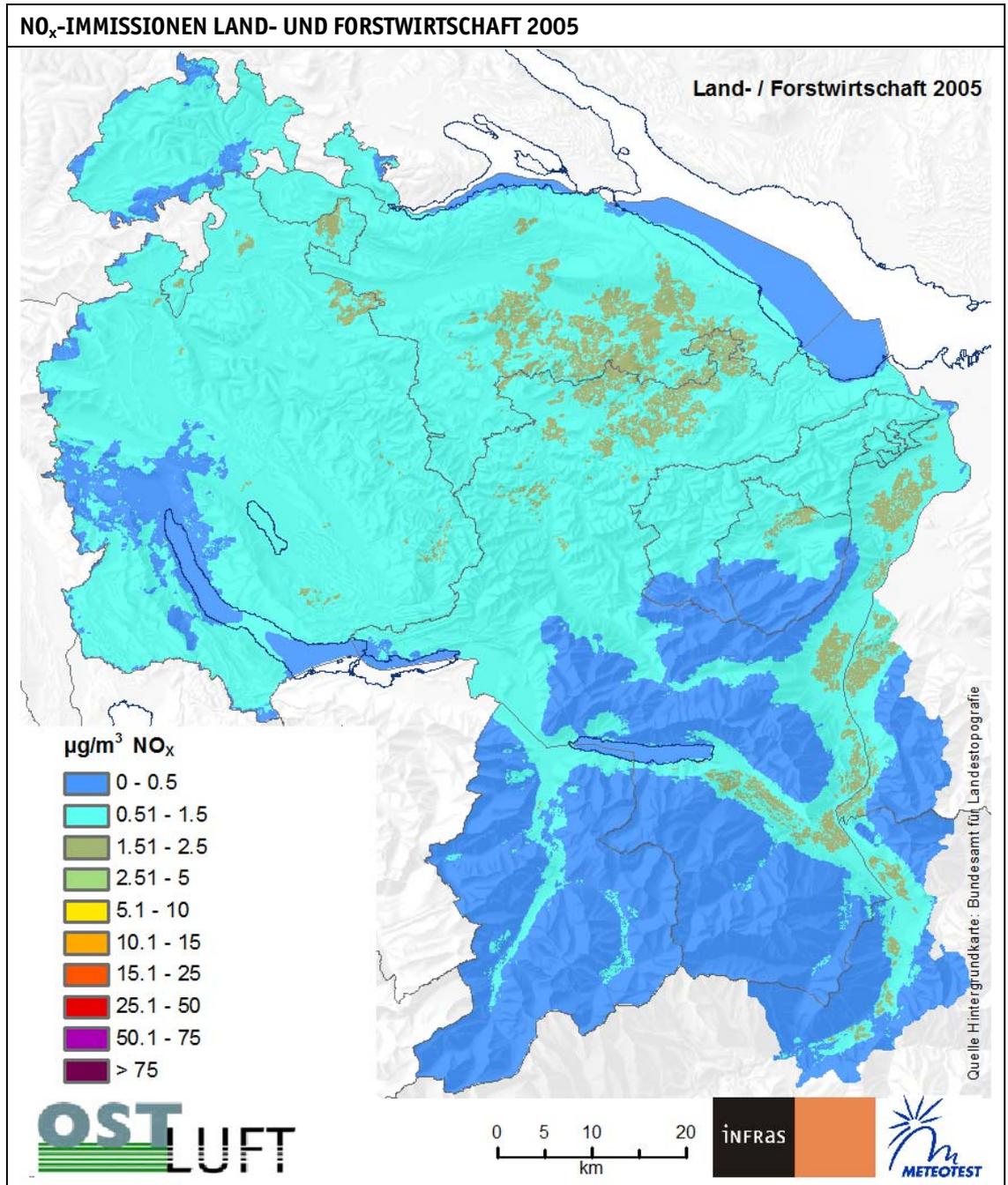
Figur 18 Jahresmittelwert NO_x-Immissionen Verkehr 2005.



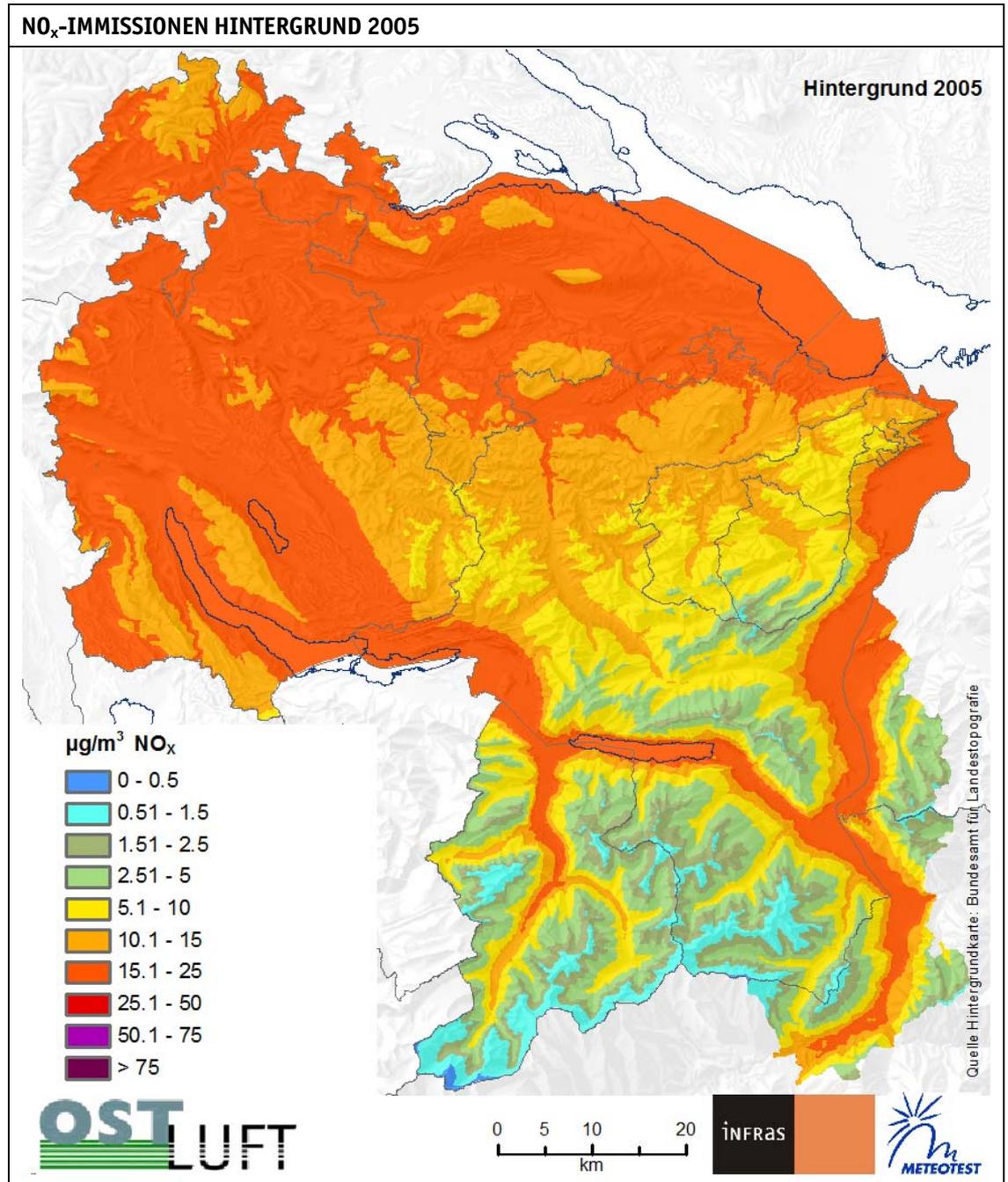
Figur 19 Jahresmittelwert NO_x-Immissionen Industrie 2005.



Figur 20 Jahresmittelwert NO_x-Immissionen Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen 2005.



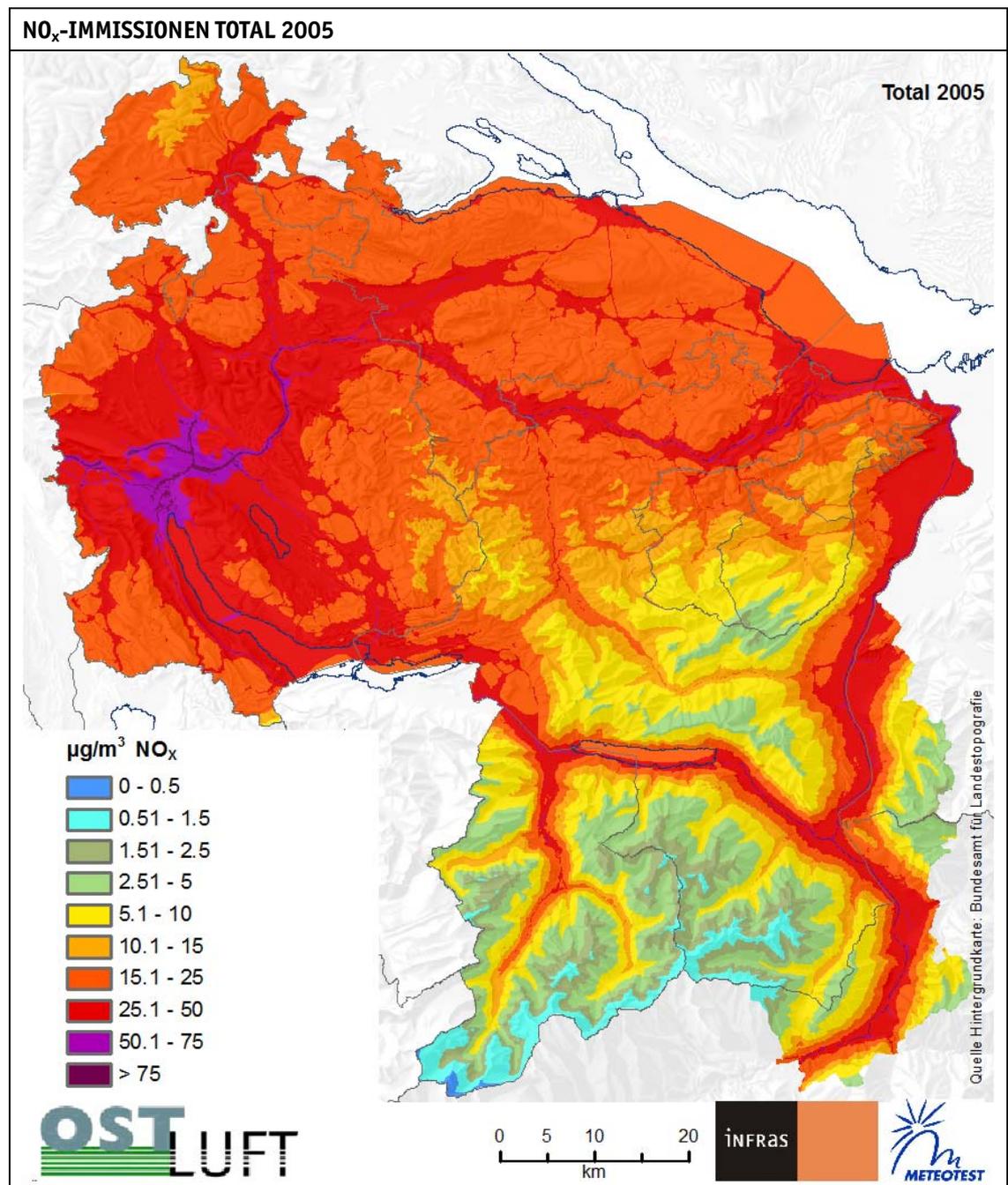
Figur 21 Jahresmittelwert NO_x-Immissionen Land- und Forstwirtschaft 2005.



Figur 22 Jahresmittelwert NO_x-Immissionen Hintergrund 2005.

4.1.2. NO_x-BELASTUNGSKARTE TOTAL

Figur 23 zeigt die Summe aller NO_x-Immissionen. Im besiedelten Gebiet und an Hauptverkehrsadern lagen die Konzentrationen im Jahr 2005 im Bereich von 25-100 µg/m³, im ländlichen Raum zwischen 15 und 50 µg/m³.



Figur 23 Jahresmittelwert totale NO_x-Immissionen 2005 (Summe Verkehr, Industrie, Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen, Land- und Forstwirtschaft, Hintergrund).

4.1.3. NO₂-BELASTUNGSKARTEN

Die folgenden Figuren zeigen die NO₂-Immissionskarten für die Jahre 2005, 2010, 2015 und 2020. Alle Konzentrationen sind als Jahresmittelwerte in µg/m³ und einer Hektaraufösung angegeben. Die NO₂-Belastungskarten sind deshalb von besonderem Interesse, weil die Schweizer Gesetzgebung einen NO₂-Immissionsgrenzwert von 30 µg/m³ vorschreibt.

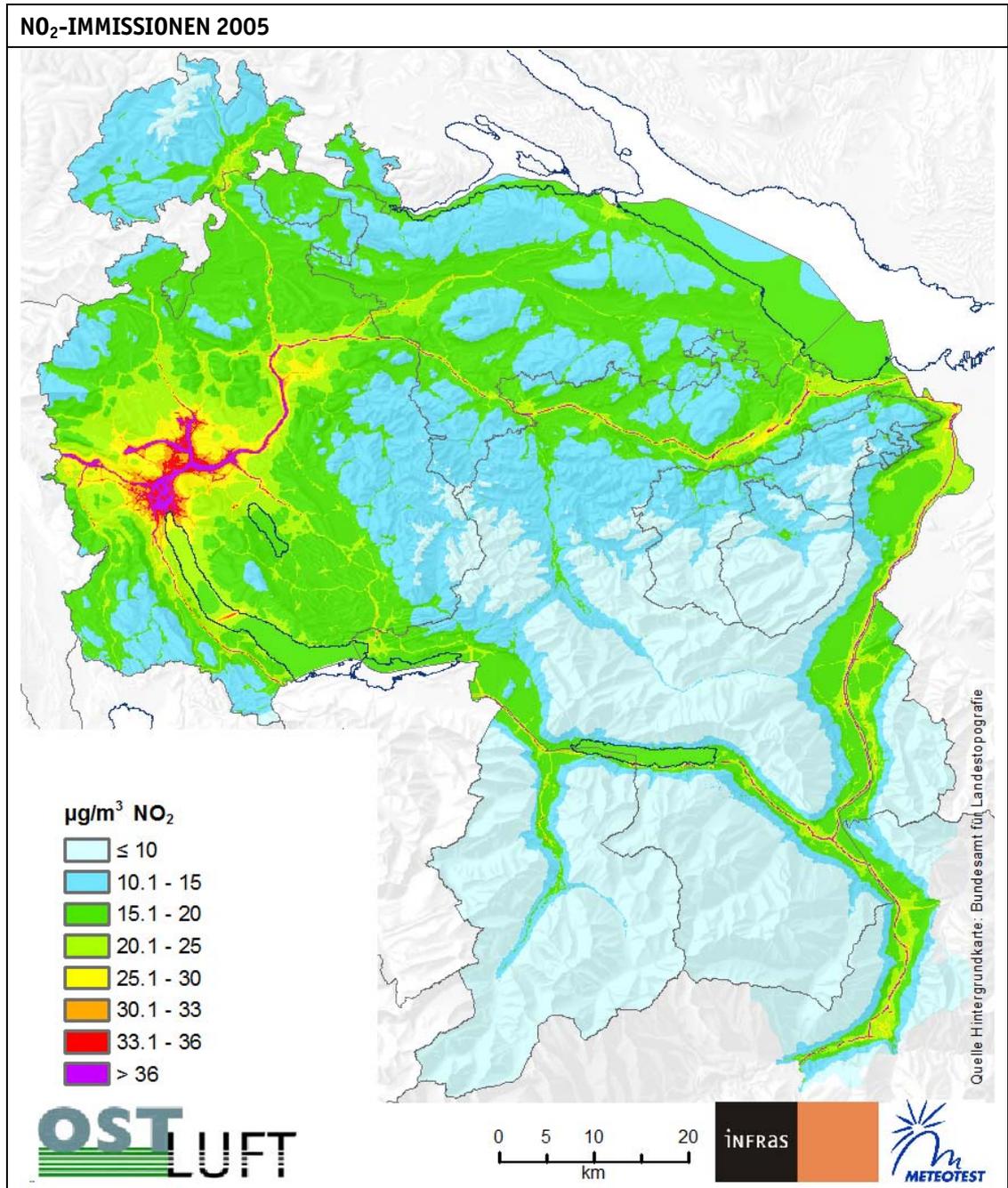
Das räumliche Muster ist demjenigen der NO_x-Belastungskarte ähnlich mit hohen Werten im Siedlungsraum und an Hauptverkehrsadern. Überschreitungen des Grenzwertes im Hektarraster treten im Jahr 2005 grossflächig in der Stadt Zürich und ihrer nahen Umgebung, in geringem Masse auch in den Städten Winterthur und St.Gallen sowie entlang der Autobahnen auf. Dabei ist zu beachten, dass die Belastungskarte räumliche Mittelwerte je Hektare repräsentiert. Auf einer Skala unterhalb des Hektarrasters (< 100m), ist deshalb auch in anderen Gebieten, vor allem entlang von vielbefahrenen Strassen, mit Grenzwertüberschreitungen zu rechnen. Wie aufgrund der Emissionsreduktionen zu erwarten, nehmen die Immissionen von 2005 bis 2020 markant ab. Die Reduktionen betragen im Siedlungsgebiet zwischen 2005 und 2010 ca. 1–3 µg/m³. Dieser Rückgang stimmt relativ gut mit dem in Messungen beobachteten Rückgang überein. Zwischen 2010 und 2015 und 2015 bis 2020 werden nochmals ähnliche Reduktionen erwartet, sodass Gebiete mit übermässiger Belastung nur noch in der Stadt Zürich und an besonders exponierten Standorten vorkommen. Bei den Aussagen zur Immissionssituation 2020 ist unbedingt zu berücksichtigen, dass sie besonders stark von dem erwarteten Emissionsrückgang des Verkehrs dank neuer Abgasnormen abhängig ist. Sollte sich in den nächsten Jahren zeigen, dass die neuen EURO Normen in der Realität nicht die erwartete Wirkung entfalten, würde sich die Immissionssituation 2020 weniger optimistisch präsentieren.

Für die Interpretation der Karten gibt es zwei wichtige Punkte zu berücksichtigen:

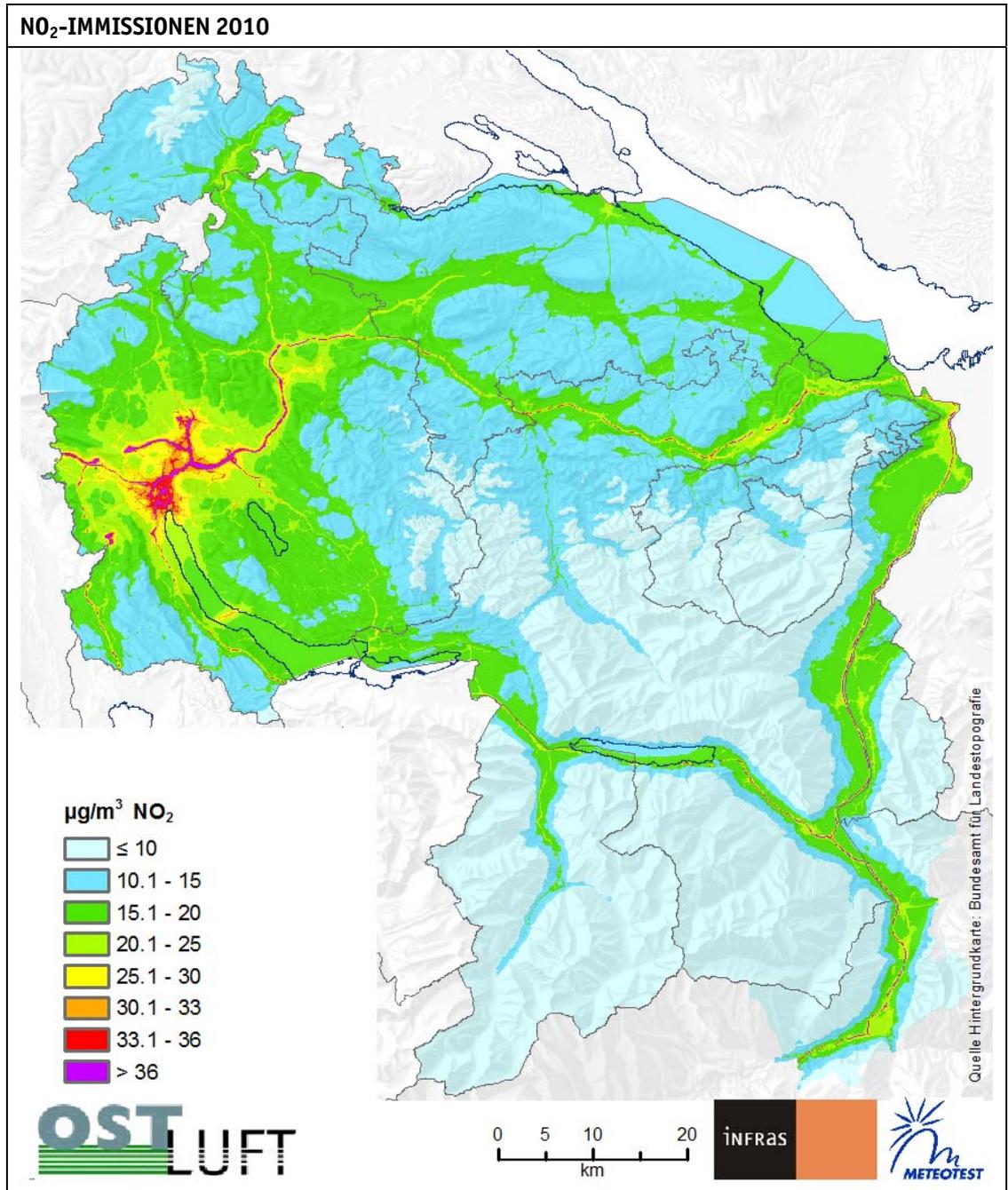
- › Aufgrund der Modellaufösung von 100 m kann das Modell keine Variationen unterhalb von 100 m darstellen. Aus Messungen ist bekannt, dass in Siedlungsgebieten kleinräumig bedeutende NO₂-Konzentrationsschwankungen in Abhängigkeit des Strassenabstandes auftreten: Der Anteil der Konzentration, der durch den Verkehr auf der Strasse verursacht wird, nimmt mit zunehmendem Abstand von der Strasse ab. Entfernt man sich von der Strasse, ist die Abnahme der Konzentration auf den ersten fünfzig Metern besonders stark (UGZ 2007). Das Modell berechnet räumliche Mittelwerte auf 100 m und kann damit Spitzenwerte im Strassenraum und insbesondere in Strassenschluchten nicht darstellen. Diese Tatsache muss beim Vergleich mit Messungen berücksichtigt werden. Wie in FOEN (2011b) abgeschätzt, können an stark befahrenen Strassen 5–30 µg/m³ NO₂ zu den Modellwerten addiert werden, um sie mit den Messwerten vergleichen zu können. Grundsätzlich wäre es möglich, das Modell auf Spitzenwerte zu

kalibrieren, aber mit Blick auf die gesuchte Bevölkerungsexposition ist die Modellierung von räumlichen Mittelwerten realistischer als jene von Spitzenwerten, weil die Wohnorte der Bevölkerung nicht auf den Strassen, sondern „dazwischen“ liegen, dort wo die Konzentrationen nicht mehr maximal sind.

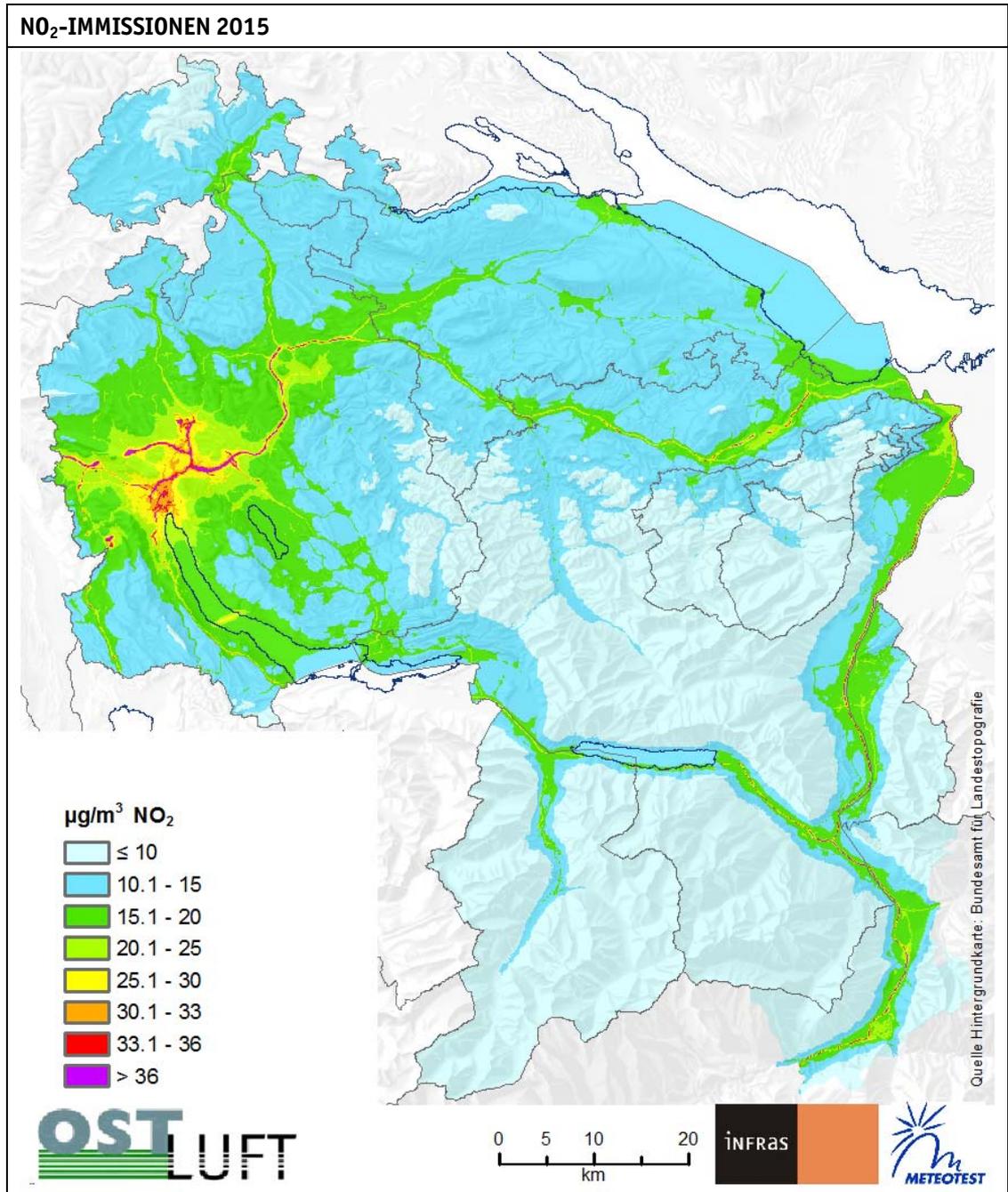
- › Gemäss Grice (2009) hat der NO_2 -Anteil an den NO_x -Emissionen des Strassenverkehrs seit 2000 von einigen wenigen Prozenten auf 20% im 2010 zugenommen und könnte bis 2020 auf über 30% steigen. Dies ist hauptsächlich eine Folge der Zunahme von Dieselmotoren der neuen Generationen (Euro 4/5) und Oxidationskatalysatoren. Dieser Effekt wird im Modell mit der zeitlich veränderlichen NO_x - NO_2 -Umwandlung empirisch nachgebildet (siehe Kap. 3.5). Für die Schweiz wurde im Bericht von Hüglin (2010) für einen stark befahrenen Strassenstandort gezeigt, dass der Anteil NO_2/NO_x von 4.2% (1989) auf 13.1% (1998) zugenommen hat. Aus den OSTLUFT-Messwerten ist ersichtlich, dass die NO_2 -Messungen in den letzten Jahren deutlich weniger stark abgenommen haben als die NO_x -Messungen. Wie weit dieser (erwartete) Effekt mit dem Verlauf des photostationären Gleichgewichts (Kap. 3.5) erklärt werden kann und wie weit er durch den erhöhten NO_2 -Anteil der Verkehrsemissionen verstärkt wird, lässt sich aber nicht einfach sagen.



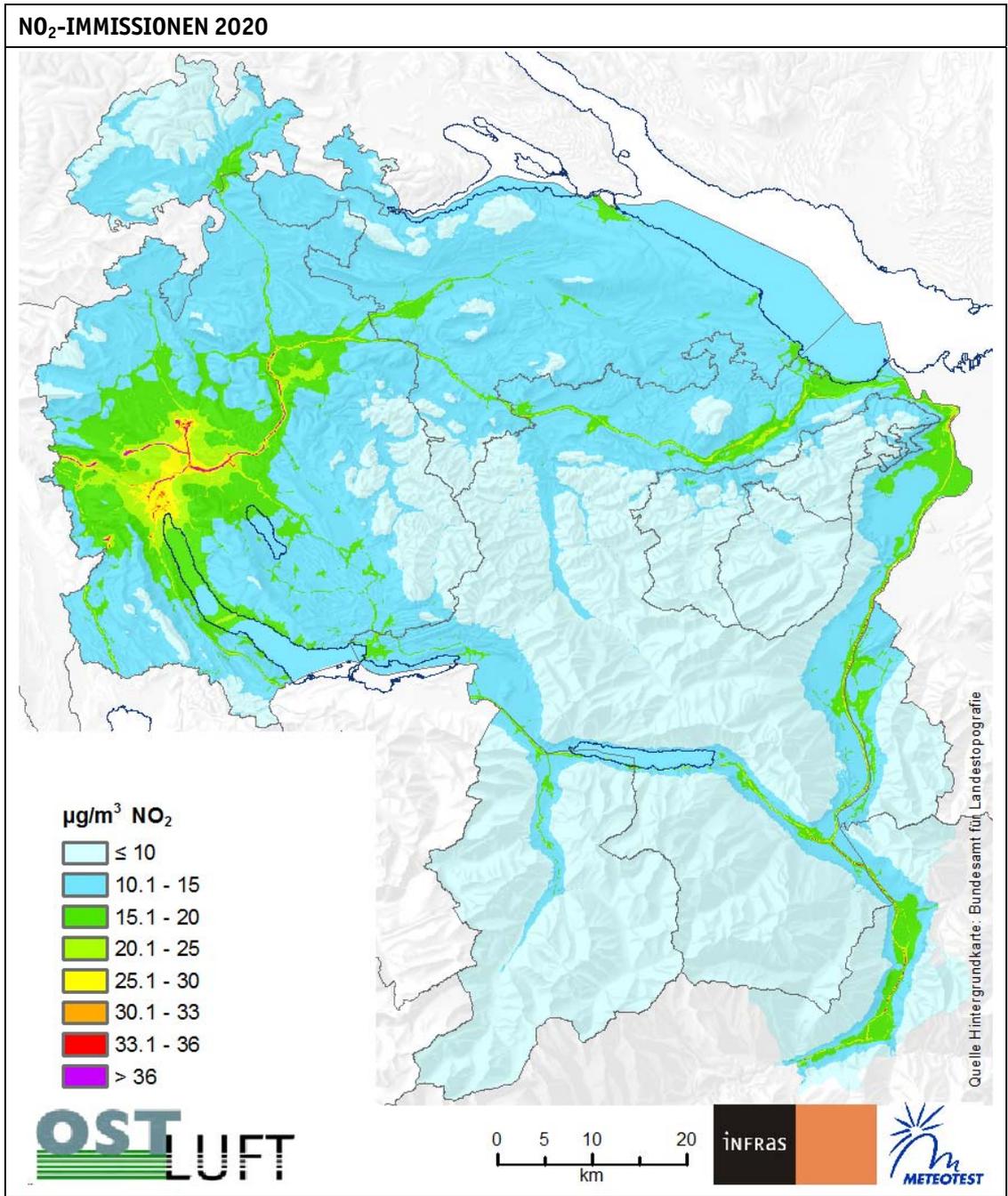
Figur 24 Jahresmittelwert NO₂-Immissionen 2005.



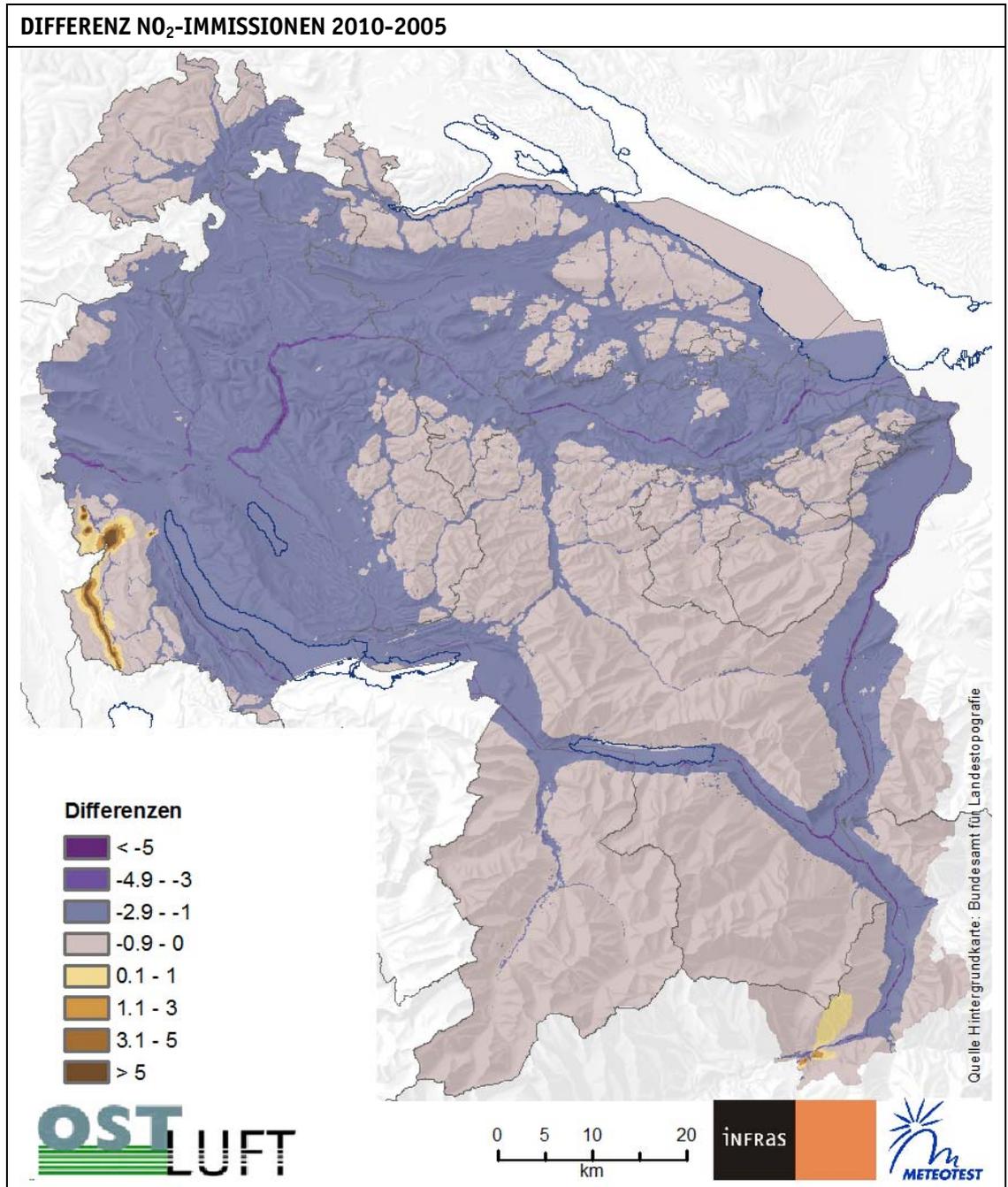
Figur 25 Jahresmittelwert NO₂-Immissionen 2010.



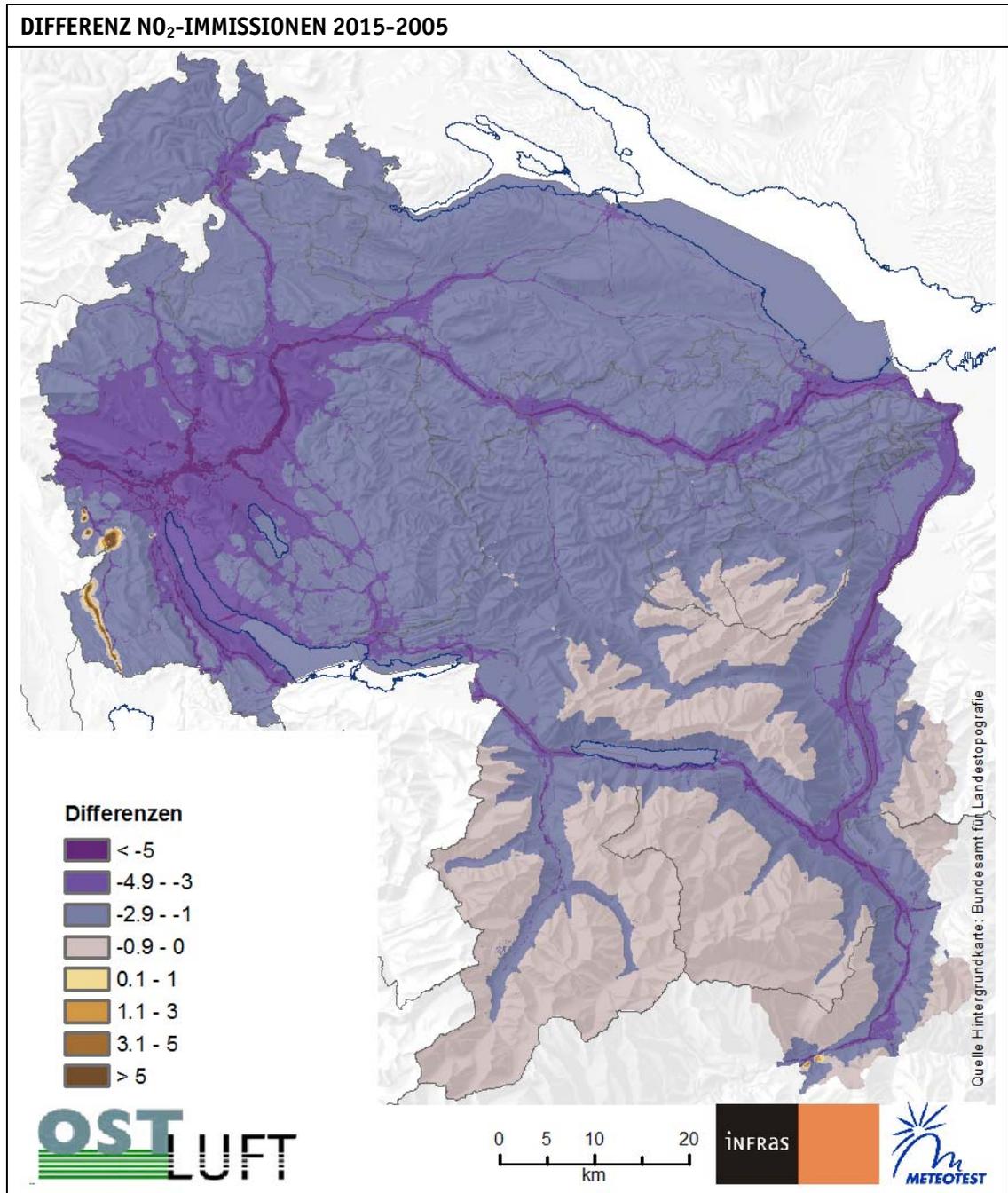
Figur 26 Jahresmittelwert NO₂-Immissionen 2015.



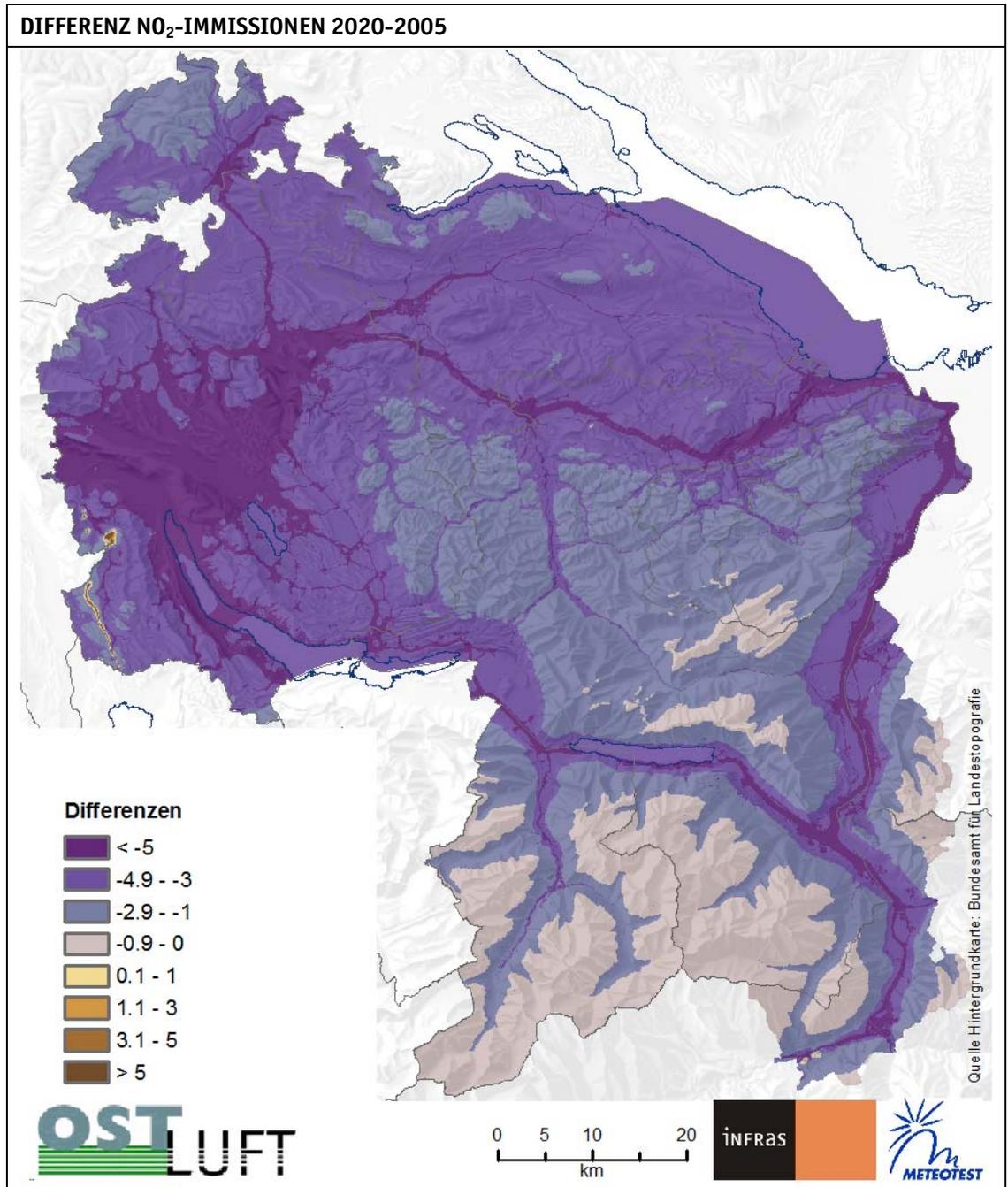
Figur 27 Jahresmittelwert NO₂-Immissionen 2020.



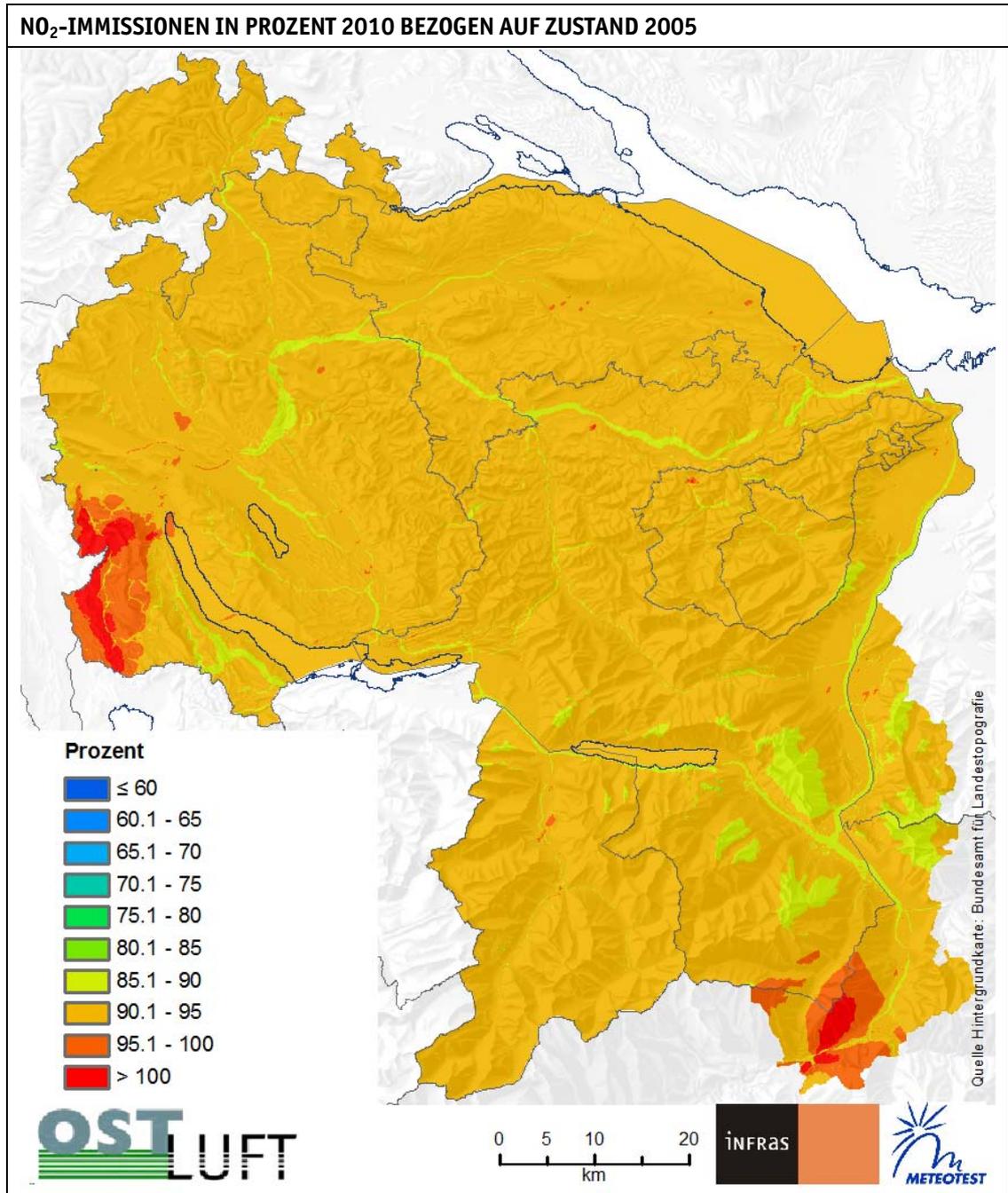
Figur 28 In den Gebieten mit Lila-Farbtönen nimmt die Immission zwischen 2005 und 2010 ab, im Gebiet der neuen West-Umfahrung Zürich mit Braun-Farbtönen nimmt die Immission zu.



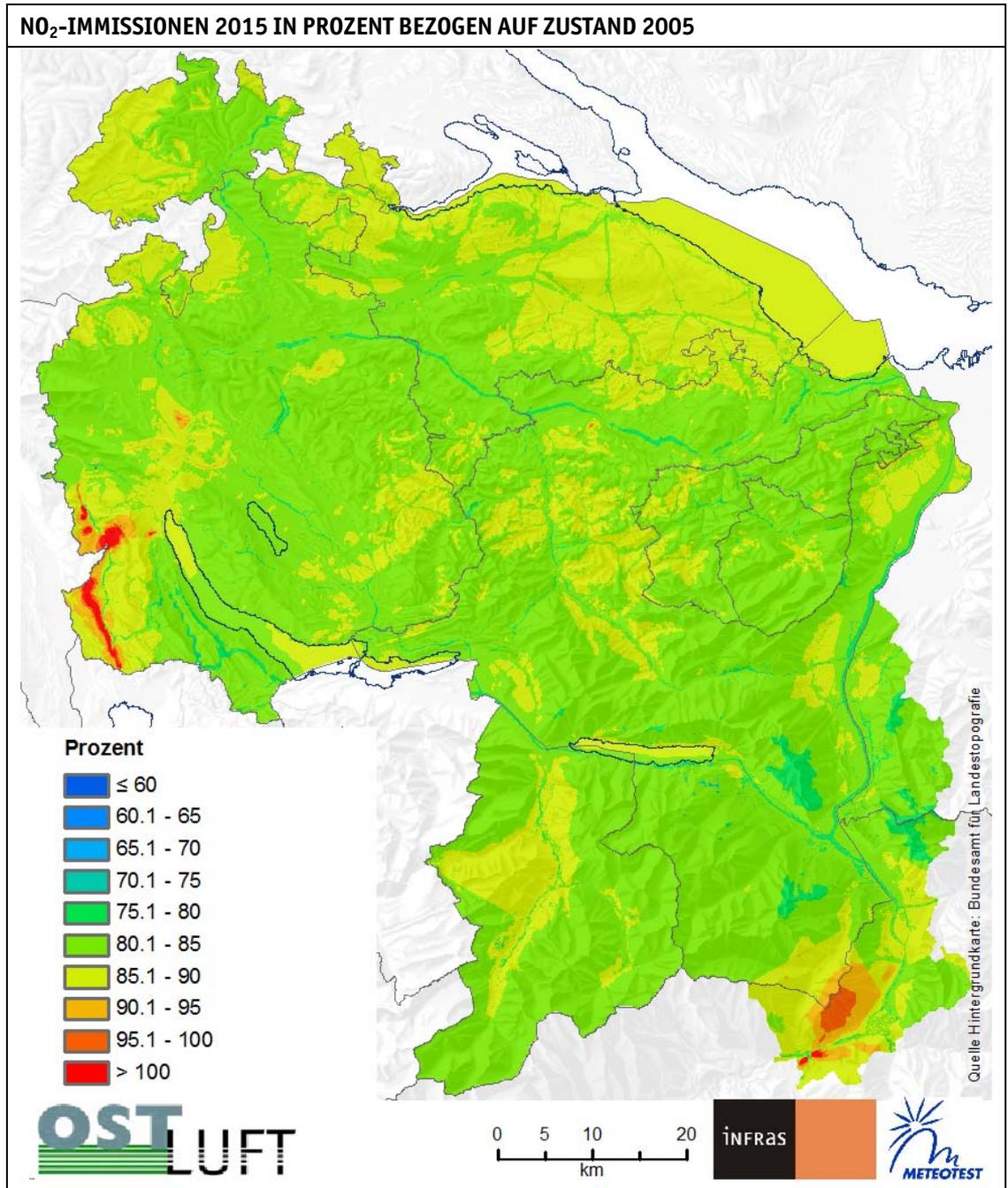
Figur 29 In den Gebieten mit Lila-Farbtönen nimmt die Immission zwischen 2005 und 2010 ab, im Gebiet der neuen West-Umfahrung Zürich mit Braun-Farbtönen nimmt die Immission zu.



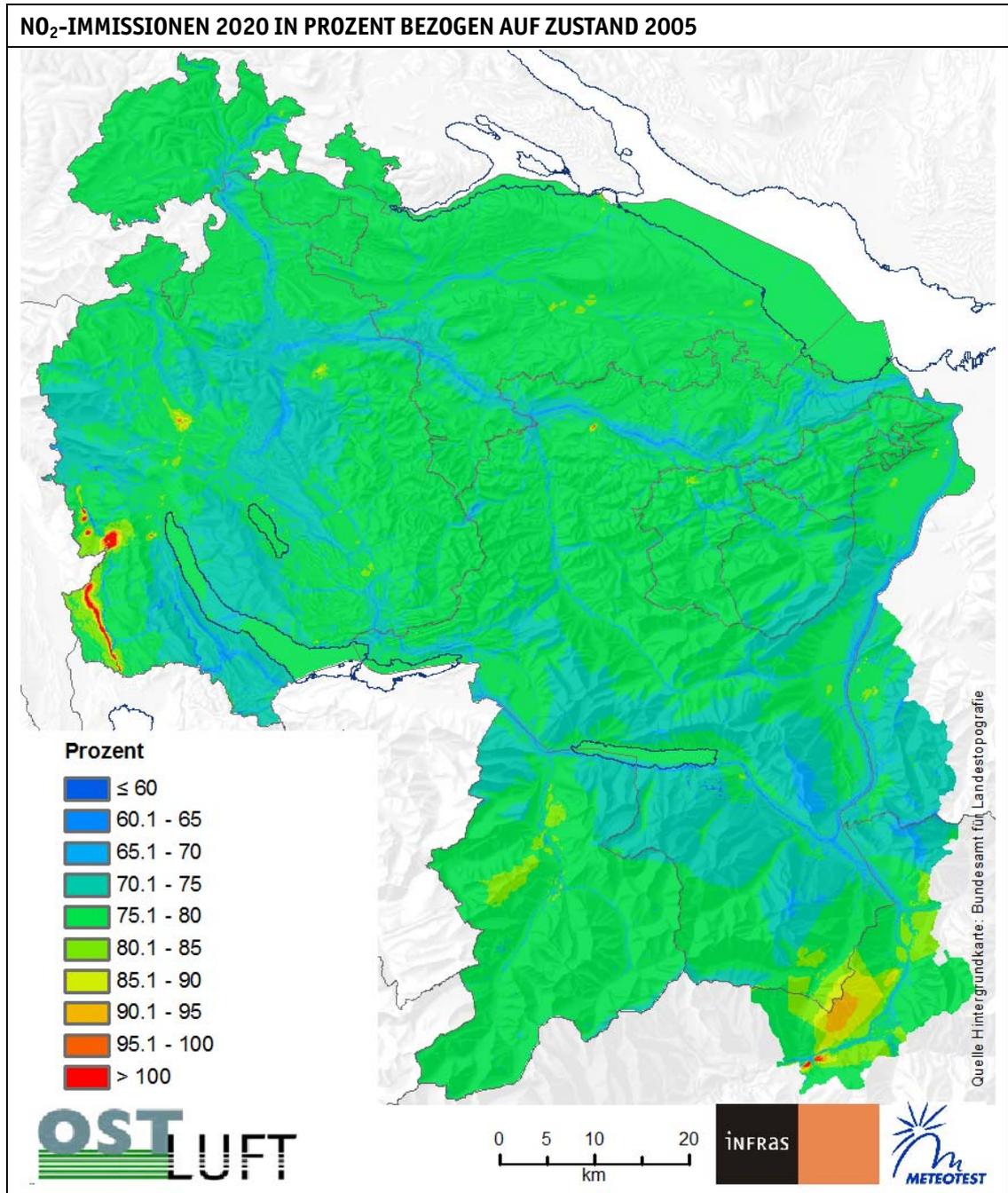
Figur 30 In den Gebieten mit Lila-Farbtönen nimmt die Immission zwischen 2005 und 2010 ab, im Gebiet der neuen West-Umfahrung Zürich mit Braun-Farbtönen nimmt die Immission zu.



Figur 31 NO₂-Immissionen 2010 in Prozent bezogen auf den Zustand 2005.



Figur 32 NO₂-Immissionen 2015 in Prozent bezogen auf den Zustand 2005.



Figur 33 NO₂-Immissionen 2020 in Prozent bezogen auf den Zustand 2005.

4.2. BEVÖLKERUNGSEXPOSITION NO₂ 2005–2020

Die Bevölkerungsexposition gibt an, in welchem Ausmass die Bevölkerung im OSTLUFT-Gebiet NO₂-Immissionen ausgesetzt ist. Die Exposition ist ein relevanter Indikator für die negative Auswirkung auf die Gesundheit. Luftschadstoffe, insbesondere NO₂, haben erwiesenermassen schädigende Auswirkungen auf den Atmungsapparat des Menschen und können auch das kardiovaskuläre System beeinträchtigen (vgl. z.B. BAFU 2007).

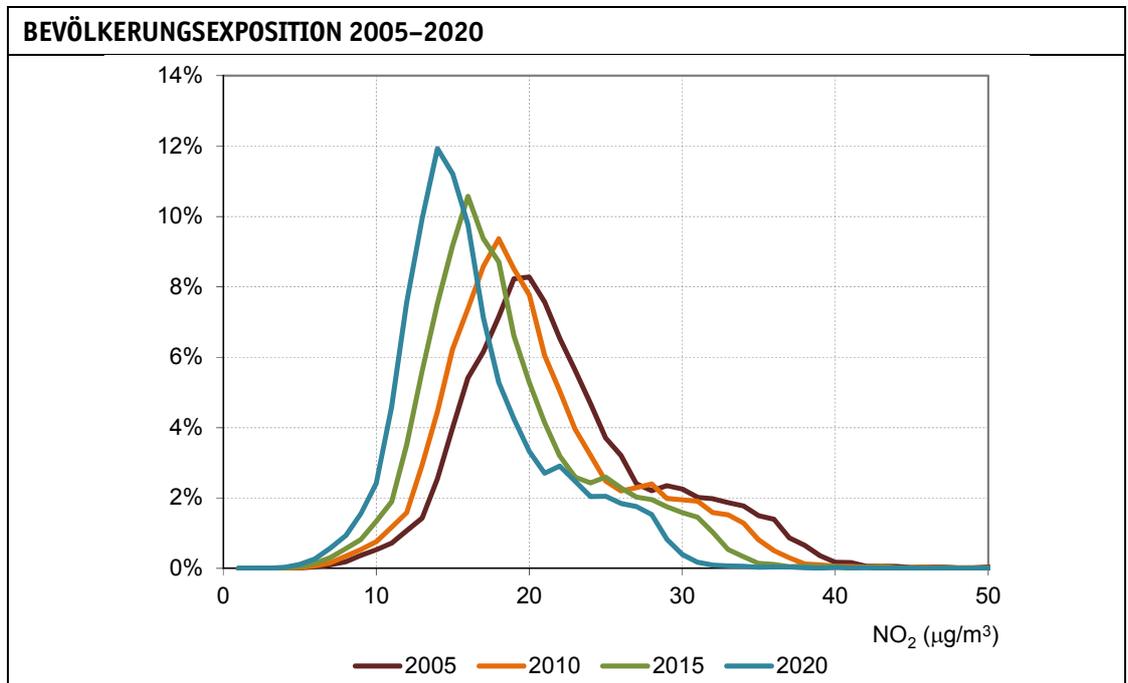
Datengrundlage für die Expositionsrechnungen 2005–2020 sind die Hektar-Daten der Volkszählung 2010 (BFS 2012). Für 2015 und 2020 stehen keine hektar-genauen Prognosen zur Verfügung. Die Expositionsergebnisse 2015/2020 gehen deshalb von einer unveränderten räumlichen Verteilung der Einwohner aus.

- › Der bevölkerungsgewichtete Mittelwert der NO₂-Immissionskonzentration im Hektarraster für 2005 beträgt 21.8 µg/m³. Bis ins Jahr 2020 sinkt er voraussichtlich auf 16.0 µg/m³ ab (siehe Tabelle 6). Ob dies eine konservative Schätzung ist oder nicht, lässt sich ohne weitere Simulation nicht entscheiden. Zwar kann man davon ausgehen, dass die Exposition für Einwohner, die direkt an einem Strassenrand wohnen, unterschätzt wird (weil das Modell keine Spitzenwerte abbildet), dass aber gleichzeitig die übrigen Einwohner überschätzt werden. Um entscheiden zu können, ob sich Über- und Unterschätzungen kompensieren oder nicht, kann nur mit einem Modell entschieden werden, das mit einer höheren Auflösung arbeitet. Ein solches steht allerdings nicht zur Verfügung.
- › Der Anteil der Bevölkerung, der in übermässig belasteten Gebieten wohnt, betrug 2005 noch 13.2%, 2015 noch 4.0% und sollte bis 2020 auf 0.6% absinken. Bei dieser Berechnung wird vorausgesetzt, dass die Modellwerte exakt sind, also keine Unsicherheit aufweisen. Würden die unvermeidbaren Unsicherheiten berücksichtigt, würden sich die Anteile verschieben, und zwar umso mehr, je steiler die Häufigkeitsverteilung (Figur 34) beim Grenzwert (30 µg/m³) verläuft. So ist insbesondere für das Jahr 2020 damit zu rechnen, dass der Anteil in Tabelle 6 (0.6%) zu optimistisch ist.

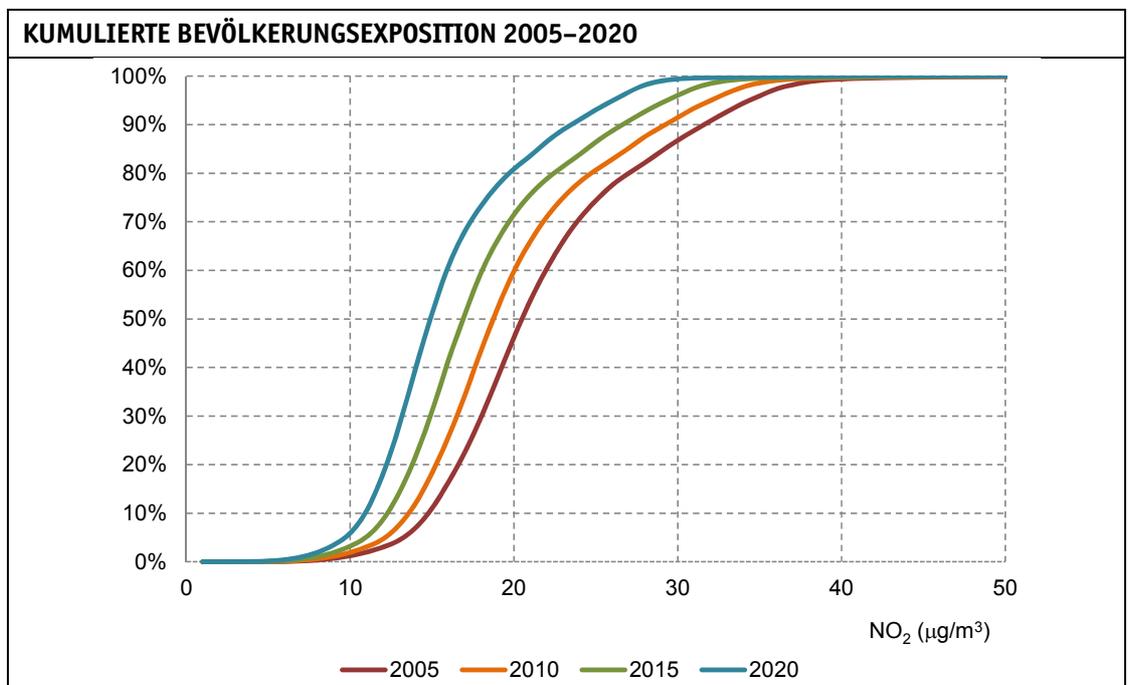
PARAMETER DER BEVÖLKERUNGSEXPOSITION				
Parameter	2005	2010	2015	2020
Bevölkerungsgewichteter Mittelwert in µg/m ³ NO ₂	21.8	20.0	18.1	16.0
Proz. Anteil Einwohner über dem Immissionsgrenzwert (30 µg/m ³ NO ₂)	13.2%	8.5%	4.0%	0.6%

Tabelle 6 Eckdaten der Bevölkerungsexposition. Erläuterungen siehe Text.

Die Figuren 33 und 34 zeigen die Bevölkerungsexposition als Häufigkeitsverteilung nach Immissionsklassen von 1 µg/m³ (Fig. 33) respektive als Summenhäufigkeit (Fig. 34).



Figur 34 Die Bevölkerungsexposition zeigt den Anteil der an der Gesamtbevölkerung des Ostluft-Gebietes pro Immissionsklasse ($1 \mu\text{g}$) für 2005, 2010, 2015, 2020. Die Farbe der Kurve zeigt das Jahr an. Lesebeispiel: Im Jahr 2005 leben ca. 8 % der Bevölkerung an einem Wohnort mit einem Jahresdurchschnitt von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$. 100% entsprechen 2.39 Mio Einwohner.



Figur 35 Kumulierte Bevölkerungsexposition (Summenhäufigkeit) NO_2 für 2005, 2010, 2015, 2020. Die Farbe der Kurve zeigt das Jahr an. Lesebeispiel: Im Jahr 2005 leben ca. 85% der Bevölkerung unter dem Jahresgrenzwert von $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Bis im Jahr 2020 sollten es 99% werden.

5. DATENQUALITÄT

5.1. VERGLEICH MESSWERTE VERSUS MODELLWERTE

5.1.1. KALIBRATION UND VALIDIERUNG

Folgendes Vorgehen wurde für den Vergleich von Modell- mit Messdaten gewählt:

- › Kalibration 2005: Zuerst wurden die NO_x - und NO_2 -Immissionen für das Jahr 2005 mit dem Modell berechnet und die Modellwerte mit den Messwerten verglichen. In mehreren Iterationsschritten wurde das Modell kalibriert, um eine optimale Übereinstimmung mit den Messdaten zu erreichen.
- › Validierung 2010: Anschliessend wurden die NO_x - und NO_2 -Immissionen für das Jahr 2010 modelliert und die Modelwerte mit den Messwerten verglichen. In diesem Vergleich wurde am Modell nichts mehr verändert. Das bedeutet, dass dem Vergleich 2010 der Status einer Validierung zukommt. In diesem Sinn lässt sich die Modellqualität korrekterweise am Zustand 2010 bestimmen.

5.1.2. MESSSTATIONEN

Die modellierten NO_x - und NO_2 -Immissionen der Jahre 2005 und 2010 werden mit den OSTLUFT-Messwerten der Jahres 2004/2005 (Mittelwert) respektive 2009/2010 (Mittelwert) verglichen. Damit wird Aufschluss über die Qualität des Modells gegeben. Die Messdaten wurden von OSTLUFT zur Verfügung gestellt. Folgende Messstationen kommen für den Vergleich in Frage:

MESSSTATIONEN OSTLUFT	
Stationsname	Abk. Stationsname
Arbon, Bahnhofstrasse	Arb_Bahnhofstrasse
Chur, A13	Chu_A13
Frauenfeld, Bahnhofstrasse	Fra_Bahnhofstrasse
Grabs, Marktplatz	Gra_Marktplatz
Heiden, Dunantheus	Hei_Dunantheus
Mels, Waeltigasse	Mel_Wältigasse
NABEL, Duebendorf	NAB_Dübendorf
NABEL, Taenikon	NAB_Tänikon
NABEL, Zürich	NAB_Zürich
Neuhausen, Galgenbuck	Neu_Galgenbuck
Opfikon, Balsberg	Opf_Balsberg
Rapperswil, Tüchelweier	Rap_Tüchelweier
St. Gallen, Bild	StG_Bild
St. Gallen, Rorschacher Strasse	StG_Rorschacher Strasse
St. Gallen, Stuelegg	StG_Stuelegg
Vaduz, Austrasse	Vad_Austrasse
Vaduz, Mühleholz	Vad_Mühleholz
Wald, Hoehenklinik	Wld_Höhenklinik
Wallisellen, Dietlikonerstrasse	Wal_Dietlikonerstrasse
Wettswil, Filderen	Wet_Filderen
Wettswil, Weieraecher	Wet_Weieraecher
Winterthur, Obertor	Win_Obertor
Zürich, Heubeeibueel	Zch_Heubeeibüel
Zürich, Schimmelstrasse	Zch_Schimmelstrasse
Zürich, Schwamendingen	Zch_Schwamendingen
Zürich, Stampfenbachstrasse	Zch_Stampfenbachstrasse

Tabelle 7 Messstationen OSTLUFT. Die Abkürzungen werden in den folgenden Tabellen benutzt.

STATION	NO _x			NO ₂		
	Messung 2004/2005	Modellwert	Differenz mod- mess	Messung 2004/2005	Modellwert	Differenz mod- mess
Chu_A13	75.3	73.5	-1.8	30.3	37.1	6.8
Fra_Bahnhofstrasse	43.1	36.0	-7.1	24.4	22.5	-1.9
Gra_Marktplatz	25.5	27.6	2.1	17.3	18.2	0.9
Hei_Dunanthaus	31.9	25.2	-6.7	19.9	16.9	-3.0
Neu_Galgenbuck	23.2	28.5	5.3	17.7	18.7	1.0
Opf_Balsberg	96.0	120.5	24.5	38.8	50.2	11.4
Rap_Tuechelweier	48.3	37.2	-11.1	29.2	23.1	-6.1
StG_Bild	55.9	51.2	-4.7	30.1	29.3	-0.8
StG_Rorschacher Strasse	57.9	44.5	-13.4	33.5	26.5	-7.0
StG_Stuelegg	12.3	18.0	5.7	10.4	12.6	2.2
Vad_Muehleholz	33.8	30.5	-3.3	20.5	19.7	-0.8
WaL_Dietlikonerstrasse	36.0	48.1	12.1	23.2	28.1	4.9
Win_Obertor	49.6	49.3	-0.3	30.2	28.6	-1.6
Zch_Heubeeribueel	27.4	49.2	21.8	21.1	28.5	7.4
Zch_Schwamendingen	124.5	115.4	-9.1	49.1	48.6	-0.5
Zch_Stampfenbachstrasse	73.3	76.3	3.0	38.2	38.5	0.3
NABEL_Zuerich	54.4	69.5	15.1	33.3	36.2	2.9
NABEL_Duebendorf	50.7	53.0	2.3	28.9	30.1	1.2
NABEL-Taenikon	20.2	23.0	2.8	14.7	15.6	0.9
Mittelwert	49.4	51.4	2.0	26.9	27.8	1.0

Tabelle 8 NO_x und NO₂ Mess- und Modellwerte [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] an den Fixstationen im Jahr 2005

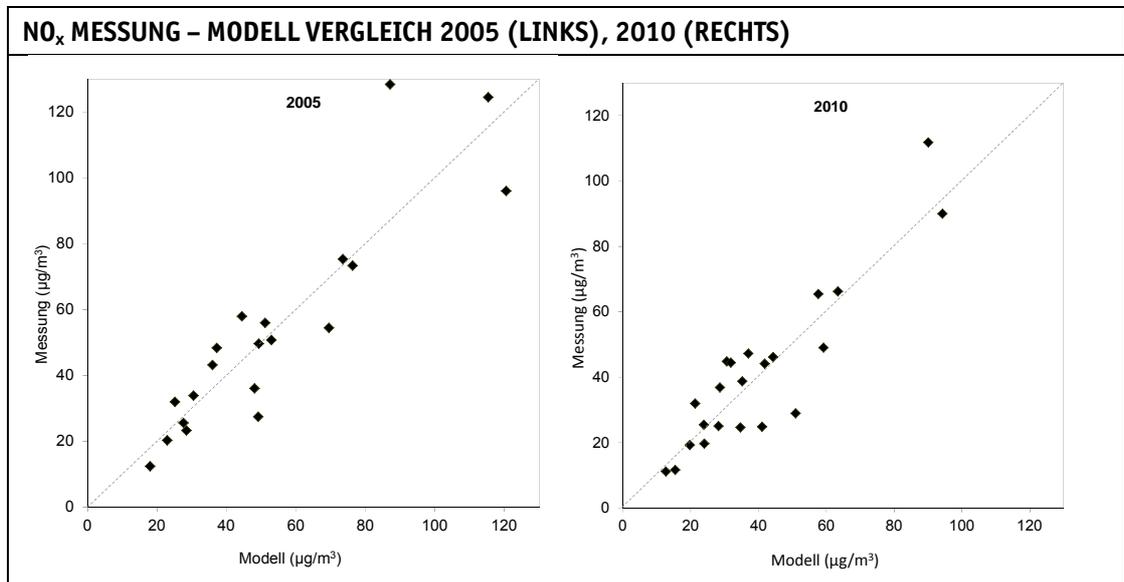
STATION	NO _x			NO ₂		
	Messung 2009/2010	Modellwert	Differenz mod- mess	Messung 2009/2010	Modellwert	Differenz mod- mess
Arb_Bahnhofstrasse	36.8	28.6	-8.2	24.8	19.7	-5.1
Chu_A13	65.4	57.6	-7.8	31.4	33.4	2.0
Fra_Bahnhofstrasse	44.8	30.7	-14.1	26.1	20.8	-5.3
Gra_Marktplatz	25.4	23.9	-1.5	18.0	16.9	-1.1
Hei_Dunanthaus	31.9	21.3	-10.6	18.6	15.3	-3.3
MeL_Waeltigasse	25.0	28.2	3.2	18.5	19.4	0.9
Neu_Galgenbuck	19.6	24.1	4.5	14.7	17.0	2.3
Opf_Balsberg	90.0	94.3	4.3	43.9	46.4	2.5
Rap_Tuechelweier	44.4	31.9	-12.5	28.4	21.4	-7.0
StG_Rorschacher Strasse	47.2	37.0	-10.2	30.7	24.2	-6.5
StG_Stuelegg	11.6	15.4	3.8	9.6	11.5	1.9
Vad_Austrasse	38.7	35.2	-3.5	23.3	23.1	-0.2
Wet_Filderen	28.9	51.0	22.1	21.3	30.8	9.5
Wet_Weieraecher	24.6	34.7	10.1	18.8	23.0	4.2
Win_Obertor	44.1	41.9	-2.2	27.1	26.6	-0.5
Wld_Hoehenklinik	11.1	12.7	1.6	8.8	9.6	0.8
Zch_Heubeeribueel	24.8	41.1	16.3	19.2	26.2	7.0
Zch_Schwamendingen	111.8	90.1	-21.7	49.8	44.8	-5.0
Zch_Stampfenbachstrasse	66.2	63.5	-2.7	36.5	36.0	-0.5
NABEL_Zuerich	49.0	59.2	10.2	32.9	34.3	1.4
NABEL_Duebendorf	46.1	44.3	-1.8	28.3	27.8	-0.5
NABEL-Taenikon	19.2	19.8	0.6	14.4	14.3	-0.1
Mittelwert	41.2	40.3	-0.9	24.8	24.7	-0.1

Tabelle 9 NO_x und NO₂ Mess- und Modellwerte [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] an den Fixstationen im Jahr 2010

5.2. VERGLEICH NO_x-MODELLDATEN MIT MESSDATEN

Die folgenden Figuren zeigen den Vergleich der NO_x Messungen mit den modellierten NO_x Modellwerten. Dabei ist zu beachten, dass methodisch verschiedene Werte miteinander verglichen werden, nämlich punktförmige Messwerte mit flächigen (räumlich gemittelten) Modellwerten. Deshalb treten zwangsläufig Abweichungen zwischen Modell- und Messwerten auf. Auch andere Ursachen können zu Abweichungen führen: Unsicherheiten sowohl bei Modell- wie auch bei Messwerten oder Unzulänglichkeiten in den Emissionskatastern, wenn z.B. im Verkehrsmodell Links fehlen, wenn auf bestehenden Links das Verkehrsmodell falsche Belastungen generiert oder wenn das Emissionsmodell wegen falscher Zuordnung von Verkehrssituationen die realen Emissionen unter- oder überschätzt. (Diese Bemerkungen im Übrigen gelten nicht nur für NO_x sondern auch für die unten folgenden NO₂-Immissionen). Für den Vergleich mit Messwerten wurden für diese die Mittelwerte von 2004/2005 und 2009/2010 gebildet um Meteo-Einflüsse zu reduzieren. Generell zeigen sich gute Übereinstimmungen und keine systematischen Abweichungen:

- › Für 2005 beträgt der Korrelationskoeffizient $R = 0.93$ und das Bestimmtheitsmass (Determinationskoeffizient) $R^2 = 0.87$. Für 2010 ist $R = 0.91$ und $R^2 = 0.83$.
- › Der Mittelwert der Messwerte beträgt im Jahr 2005 $49.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und derjenige der Modellwerte $51.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (siehe Tabelle 8). Im Jahr 2010 (siehe Tabelle 9) sind es $41.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Messwerte und $40.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Modellwerte.
- › Man beachte, dass das Set der Messstationen im Jahr 2005 mit dem Set 2010 nicht (vollständig) übereinstimmt. Die Abweichung zwischen den gemittelten Modellwerte und den gemittelten Messwerten dürfen deshalb nicht als systematisch interpretiert werden. Auch dürfen die Abnahmen der gemittelten Mess- und Modellwerte nicht als repräsentativ für das OSTLUFT-Gebiet betrachtet werden.



Figur 36 Vergleich der modellierten NO_x-Werte (x-Achse) mit den NO_x-Messwerten an Fixstationen (y-Achse) für 2005 (Diagramm links: 20 Messungen) und 2010 (Diagramm rechts: 22 Messungen).

5.3. NO₂-VERGLEICH MODELL- MIT MESSDATEN

5.3.1. VERGLEICH MIT MONITOR-MESSDATEN

Für den Vergleich der NO₂-Modell- mit den NO₂-Messwerten gilt wie beim NO_x, dass methodisch verschiedene Werte miteinander verglichen werden, nämlich punktförmige Messwerte mit flächigen (räumlich gemittelten) Modellwerten. Dies ist bei der Interpretation zu beachten (z.B. müssen einzelne Stationen unmittelbar am Rand von Strassen mit extrem hoher Belastung von der Betrachtung ausgeschlossen werden.) Auch beim NO₂ wurden wieder die Messwerte als Mittelwerte von 2004/2005 und 2009/2010 gebildet, um Meteeinflüsse zu reduzieren. Für 2010 wurde die Messstation Zürich Schimmelstrasse aufgrund einer Baustelle (Messung ohne Verkehr) von der Analyse ausgeschlossen. Da es sich zudem um eine Station mit sehr viel Verkehr, grosser Strassennähe und dichter Bebauung handelt, wurde sie auch für 2005 ausgeschlossen.

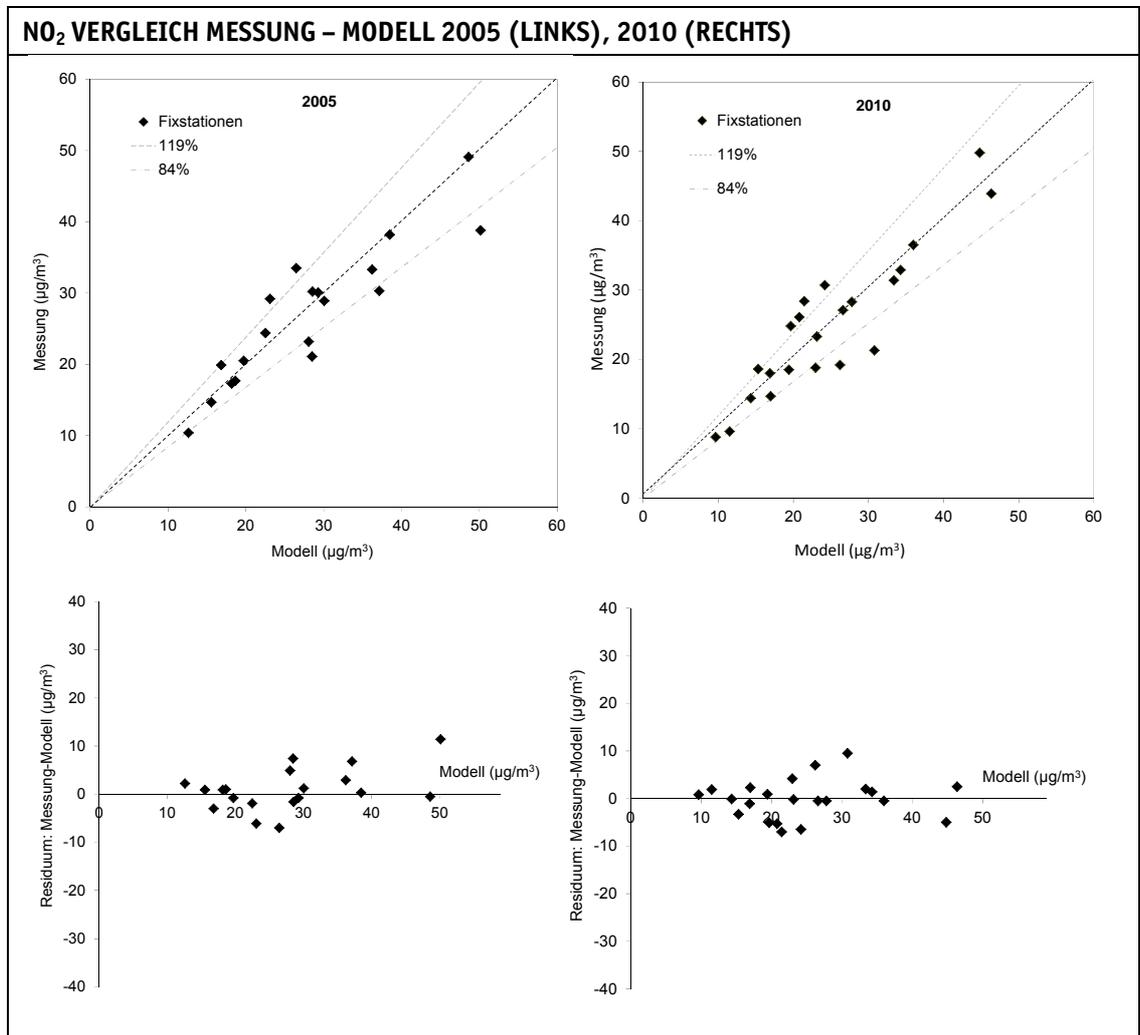
Der Vergleich der NO₂-Modellwerte mit den Messungen zeigt eine gute Übereinstimmung (Figur 37):

- › Für 2005 beträgt der Korrelationskoeffizient $R = 0.91$ und das Bestimmtheitsmass (Determinationskoeffizient) $R^2 = 0.82$. Für 2010 stimmen die Werte sogar noch besser überein: $R = 0.92$ und $R^2 = 0.84$.
- › Dasselbe Bild zeigen die Mittelwerte. 2005 beträgt derjenige der Messwerte $26.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und derjenige der Modellwerte $27.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Für das Jahr 2010 beträgt der Mittelwert der Messwerte $24.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, derjenige der Modellwerte $24.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (siehe Tabelle 8 und Tabelle 9).

12 der 19 modellierten Werte (68%) sind innerhalb eines Faktors von 1.19 der gemessenen Werte. Angenommen, die gemessenen Werte sind exakt², kann daraus eine **Modellunsicherheit von 19%** abgeleitet werden. Aufgrund der geringen Zahl von Messungen, ist dieser Wert relativ sensitiv auf einzelne nicht geeignete Messstationen, d.h. solche welche vom Modell aufgrund ihrer Lage nicht adäquat abgebildet werden können. Entfernt man die am schlechtesten abgebildete Station Opfikon (strassennah, etc.), dann verringert sich die Modellunsicherheit auf 9%. Diese Tatsache, sowie ein Vergleich mit der in gleicher Weise bestimmten Unsicherheit von 18% in der Schweizer Applikation (FOEN 2011b), zeigt dass die Unsicherheit für die OSTLUFT Applikation zwischen 9% und 19% liegt.

Zusätzlich sind in Figur 37 die Residuenplots 2005 und 2010 aufgezeigt. Die Verteilung der Residuen (Differenz Mess- minus Modellwert) in Funktion der Modellwerte kann Hinweise auf systematische Modellfehler geben. Sowohl für 2005 als auch für 2010 sind aber keine systematischen Abweichungen erkennbar.

² Die Unsicherheit der gemessenen Jahresmittelwerte beträgt 3–5 µg/m³ (EMPA 2010).



Figur 37 Vergleich der NO₂-Messungen an Fixstationen (y-Achse) mit den modellierten NO₂-Werten (x-Achse) für 2005 (links, 20 Messstationen) und 2010 (rechts, 22 Messstationen). 12 der 19 modellierten Werte (68%) liegen innerhalb der grauen Linien 119% und 84% (vergleiche dazu den Text). Die unteren Figuren zeigen die Residuenplots (Differenz Messungen minus Modell versus Modellwerte) der jeweiligen obenstehenden Messung-Modell-Grafiken.

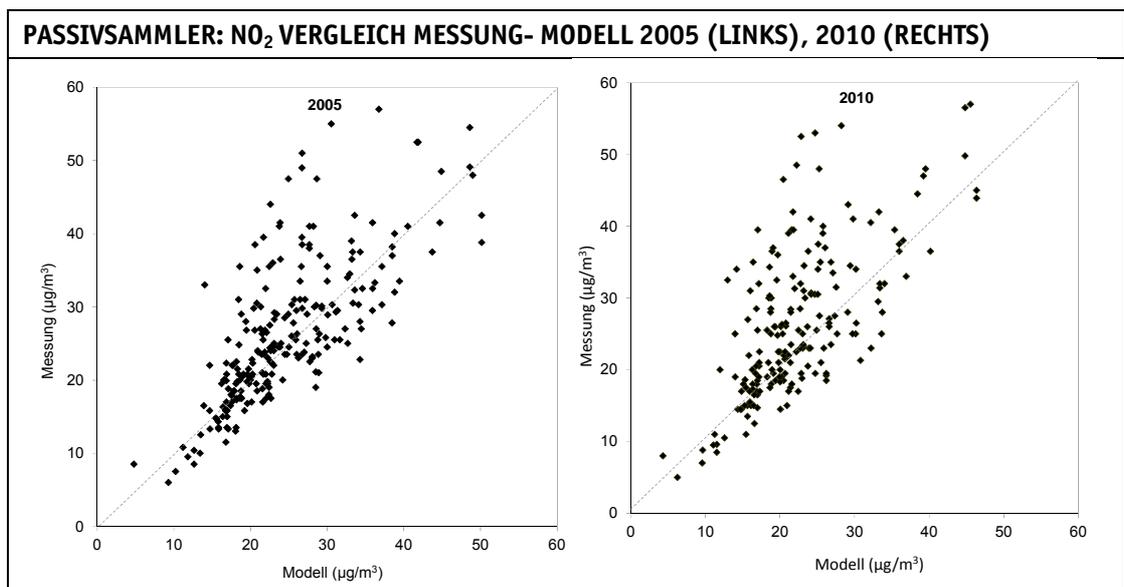
5.3.2. VERGLEICH MIT PASSIVSAMMLER-MESSDATEN

In Figur 38 folgt ein Vergleich der NO₂-Modellwerte mit den Messwerten von Passivsammlern. Im OSTLUFT-Messnetz werden die Passivsammler auf das Referenzverfahren der Monitormesswerte kalibriert.

Figur 38 zeigt für die Mehrheit der Messstationen ebenfalls eine gute Übereinstimmung, allerdings mit grösserer Streuung der Punkte als beim Vergleich mit den Monitor-Messwerten der Fixstationen und mit einer systematische Abweichungen bei 10-20 Messstationen mit Messwerten im Bereich 35-50 µg/m³. Das betrifft Stationen an Orten mit hohen Konzentrationen. Hohe

Konzentrationen kommen in Strassennähe vor, wo viele Passivsammlerstandorte liegen. An solchen Standorten ist, wie in Kap 4.1.3 erwähnt, der Vergleich zwischen einem punktförmigen Messwert am Strassenrand und einer räumlich mittleren (100 m x 100 m) Modellkonzentration nicht angemessen, an solchen Orten sollten die Messwerte entsprechend der Modellkalibration effektiv höher sein als die Modellwerte. In diesem Sinn entsprechen die Abweichungen den Erwartungen.

Der Vergleich zwischen den beiden Jahren 2005 und 2010 in Figur 38 erweckt optisch den Eindruck, dass die Unterschätzung durch das Modell im Jahr 2010 häufiger auftritt als im Jahr 2005. Dies könnte als Hinweis verstanden werden, dass die Immissionen respektive die Emissionen im Modell zu stark abnehmen, weil etwa die erwartete Abnahme der Verkehrsemissionen in der Realität hinterher hinkt oder dass die Umwandlung von NO_x in NO_2 im Strassenraum im Jahr 2010 mit der Funktion (Figur 16) nicht genügend nachgebildet wird. Allerdings lassen sich diese Hypothesen aus dem Vergleich bei den Fixstationen (Figur 37) nicht ohne Weiteres bestätigen.



Figur 38 Vergleich der NO_2 -Messungen von Passivsammlern (y-Achse) mit den modellierten NO_2 -Werten (x-Achse) für 2005 (219 Messungen) und 2010 (273 Messungen).

LITERATUR

- ARE 2010: Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK, Basismodell 2005, Bundesamt für Raumentwicklung, Bern 21.12.2010
- ATAL/BUWAL 1994: Amt für Technische Anlagen und Lufthygiene des Kantons Zürich (heute AWEL) und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Empirisches Modell für NO₂-Immissionen, Konzeptstudie INFRAS/METEOTEST, Zürich/Bern, 21.11.1994
- AWEL 1996: Luftprogramm für den Kanton Zürich, Massnahmenplan Lufthygiene. Direktion der öffentlichen Bauten des Kantons Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie, Luft AWEL.
- Bächlin et al. 2006: Überprüfung des NO-NO₂-Umwandlungsmodells für die Anwendung von Immissionsprognosen für bodennahe Stickoxidfreisetzung, W. Bächlin, R. Bösinger, A. Brandt, T. Schulz, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 66 (2006) Nr. 4 April.
- BAFU 2007: Dreckige Luft schlägt auch aufs Herz. UMWELT 4/07, pp.11-14, Bern.
- BAFU 2010: NABEL - Luftbelastung 2009, Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoff (NABEL). Umwelt-Zustand Nr. 1016, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BAFU 2010a: Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1990–2035, Aktualisierung 2010, Umweltwissen Nr.1021, INFRAS im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, Bern
- BFS 2001: Arealstatistik 1992/97 – Nomenklatur NOAS92: Basiskategorien und Aggregationen http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/infothek/erhebungen_quellen/blank/blank/arealstatistik/03/03_04.Document.87948.pdf [12.11.2012]
- BFS 2012: STATPOP2010, Bundesamt für Statistik (BFS), GEOSTAT, Download 12.04.2012 http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/infothek/erhebungen_quellen/blank/blank/statpop/01.html [12.11.2012]
- BMJ 1987: Richtlinie zur Durchführung von Ausbreitungsrechnungen nach TA Luft mit dem Programmsystem AUSTAL86. Bundesminister für Justiz (BMJ), Bundesanzeiger G 1989 A, 39, number 131a (ISSN 0720-6100)
- BUWAL 1997: NO₂-Immissionen in der Schweiz 1990–2010. Schriftenreihe Umwelt Nr. 289, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BUWAL 1999: Modellierung der PM10-Belastung in der Schweiz, Schriftenreihe Umwelt Nr. 310, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Düring I., Bächlin W., Ketzler M., Baum A., Friedrich U., Wurzeler S., 2011: A new simplified NO/NO₂ conversion model under consideration of direct NO₂-emissions. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 20, NO. 1, 067-073, Feb. 2011.

- EMPA 2010: Technischer Bericht zum Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL), EMPA im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, Dübendorf.
- FOEN 2011a: Switzerland's Informative Inventory Report 2011, Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Submission of March 2011 to the United Nations ECE Secretariat, Federal Office for the Environment, Bern.
- FOEN 2011b: NO₂ ambient concentrations in Switzerland. Modelling results for 2005, 2010, 2015. Federal Office for the Environment, Bern. Environmental studies no. 1123: 68 pp.
- Grice 2009: Recent trends and projections of primary NO₂ emissions in Europe, Susannah Grice, John Stedman, Andrew Kent, Melanie Hobson, John Norris, John Abbott, Sally Cooke. Atmospheric Environment 43 (2009) 2154–2167.
- Hüglin C. 2010: Stickstoffimmissionen in der Schweiz, lange Messreihen und ihre Trends. Christoph Hüglin, Abt. Luftfremdstoffe/Umwelttechnik, Empa Dübendorf, Tagung „Stickstoffverbindungen in der Atmosphäre“ (20.01.2010).
- INFRAS 2010 : Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs, Version 3.1, INFRAS im Auftrag des Bundesamts für Umwelt. Bern.
- LHA/AFU 2005: NO₂- und PM₁₀-Immissionen, Modellresultate 2000, 2010, INFRAS/METEOTEST im Auftrag des Lufthygieneamts beider BASEL (LHA) und des Amts für Umwelt des Kantons Solothurn, Schlussbericht. Zürich/Bern.
- OSTLUFT 2003: NO₂-Immissionen Ostschweiz, Modell und Resultate 2000. Schlussbericht. INFRAS/METEOTEST im Auftrag der Luftreinhalte-Fachstellen der Ostschweizer Kantone und des Fürstentum Liechtensteins, Zürich/Bern.
- OSTLUFT 2007: Partikelimmissionen Ostschweiz/Liechtenstein, Modell und Resultate 2000. Schlussbericht. INFRAS/METEOTEST im Auftrag der Luftreinhalte-Fachstellen der Ostschweizer Kantone und des Fürstentum Liechtensteins, Zürich/Bern.
- OSTLUFT 2011: Dokumentation Emissionskataster OSTLUFT, Version 2.0, November 2011
- Romberg E. et al. 1996: NO-NO₂-Umwandlungsmodell für die Anwendung bei Immissionsprognose Kfz Abgase, Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft, Band 56, Heft 6 (1996), pp. 215–218.
- SAEFL 2003: Modelling of PM₁₀ and PM_{2.5} ambient concentrations in Switzerland 2000 and 2010, Environmental Documentation No. 169, Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern.
- SAEFL 2004: Modelling of NO₂ and benzene ambient concentrations in Switzerland 2000 to 2020, Environmental Documentation No. 188, Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern.
- SBB 2010: Email von C. Rémy, Leiter Bahn-Umwelt Center an F. Leippert, INFRAS, 29.6.2010.

Schäffeler/Keller 2008: Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors, Studie für die Jahre 1980–2020, Umwelt-Wissen Nr. 0828, Bundesamt für Umwelt BAFU 2008, Bern.

UGZ 2007: Abstandsversuch mit NO₂-Passivsammler, Berechnung der durchschnittlichen NO₂-Abnahme mit zunehmendem Abstand zur Fahrbahn. Stadt Zürich, Umwelt und Gesundheitsschutz, Zürich.

Flughafen Zürich AG 2010: Flughafen Zürich AG, E-mail von Silvio Maraini an F.Leippert, INF-RAS, 3. 6. 2010

Flughafen Zürich AG 2011: Umweltbericht Flughafen Zürich 2011.

<http://www.flughafen->

[zu-](#)

[erich.ch/Portaldata/2/Resources/documents_unternehmen/umwelt_und_laerm/05 Umweltschutz 2011 de.pdf](http://www.flughafen-erich.ch/Portaldata/2/Resources/documents_unternehmen/umwelt_und_laerm/05_Umweltschutz_2011_de.pdf) 12.11.2012]